



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍDÍCÍ DESKA PRO KVADROKOPTÉRU

CONTROLLER FOR QUADROCOPTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Tilgner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Burian, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Martin Tilgner

ID: 174416

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Řídící deska pro kvadrokoptéru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou multikoptér, zaměřte se především na senzorickou část, která je potřeba pro úspěšnou stabilizaci letu.
2. Seznamte se se senzory, které jsou nutné pro stabilizaci letu. Zejména jde o gyroskopy, akcelerometry a barometrické výškoměry. Odhadněte (alespoň rámcově) potřebné přesnosti těchto senzorů pro úspěšné splnění tohoto úkolu.
3. Na základě předchozí rešerše vyberte vhodné senzory potřebné pro stabilizaci multikoptéry. Výběr zdůvodněte.
4. Seznamte se s problematikou řízení motorů vhodných pro malé létající stroje. Vyberte vhodnou elektroniku pro řízení tohoto motoru.
5. Navrhněte a realizujte základní desku řídicí jednotky pro kvadrokoptéru, která bude schopna zpracovat data z vybraných senzorů, a současně bude umožňovat řízení nadřazeným systémem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Robertson, T.: Printed circuit board designer's reference: basics. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Professional Technical Reference, c2004. ISBN 0130674818.

Hoffmann M. a kol.: „Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment,” Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Aug. 2007.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 29.5.2017

Vedoucí práce: Ing. František Burian, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem a realizací řídicí desky pro dron typu quadrotor. Cílem práce je navrhnout a vyrobit řídicí jednotku schopnou stabilizace dronu a komunikace s nadřazeným systémem. Předpokládá se použití opensource firmware pro řízení letounu.

Celá práce je rozdělena na pět částí. První část se věnuje principu letu kvadrokoptéry a vytvoření jednoduchého fyzikálního modelu kvadrokoptéry. Druhá část se věnuje motorům pro malé letecké stroje a řídicí elektronice, která je pro ně vhodná. Ve třetí části je věnována pozornost snímačům potřebným pro stabilizaci letu a jejich výběru. Čtvrtá část se věnuje návrhu a realizaci DPS řídicí desky pro kvadrokoptéru a v páté části je pozornost věnována řídicímu software.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kvadrokoptéra, UAV, Měření náklonu, Měření výšky, Mikrokontroler, návrh DPS

ABSTRACT

This thesis deals with design and creation of control board for the type of drone quadrotor. The aim of this work is to design create a control unit capable of drone stabilization and communication with superior system. It is assumed that there will be used open source firmware for quadcopter controlling.

The work is divided into five parts. The first one deals with the quadcopter flight principle and creation simple physical model of the quadcopter. The second part deals with electrical motors for small flying machines and the suitable operating electronics. The third part deals with sensors necessary for flight stabilization and their selection. The fourth part deals with design and creation of PCB control board for the quadcopter and the fifth part deals with the operating software.

KEYWORDS

Quadcopter, UAV, Tilt Measurement, Altitude Measurement, Microcontroller, design of a PCB

TILGNER, M. *Řídicí deska pro kvadrokoptéru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Burian, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Řídící deska pro kvadrokoptéru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **26. května 2017**

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Františkovi Burianovi, Ph.D. a Ing. Petrovi Gábrlíkovi za účinnou metodickou a odbornou pomoc a další cenné rady a připomínky při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **26. května 2017**

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Princip letu kvadrokoptéry.....	12
2.1	Model kvadrokoptéry.....	12
2.1.1	Posuvný pohyb v ose Z – stoupání a klesání	13
2.1.2	Posuvný pohyb v osách X a Y – let dopředu a do boku	14
2.1.3	Otáčení kolem osy X a Y	14
2.1.4	Otáčení kolem osy Z	16
3	Motory pro malé letecké stroje	17
3.1	Princip bezkomutátorových motorů.....	17
3.2	Řízení motoru – frekvenční měniče	18
3.3	Tah motoru	19
4	Snímače pro stabilizaci letu	23
4.1	Akcelerometr.....	23
4.2	Gyroskop.....	23
4.3	Magnetometr	24
4.4	Barometr.....	24
4.5	Ultrazvukový snímač	24
4.6	Odhad potřebného rozsahu snímačů	25
4.7	Výběr snímačů	26
4.7.1	MPU-6050	27
4.7.2	HMC5883L.....	28
4.7.3	MS5611.....	28
4.7.4	SRF08	28
5	Konstrukce	29
5.1	Návrh řídicí desky	29
5.1.1	Blokové schéma zapojení	29
5.1.2	Mikrokontroler ATmega 2560.....	30
5.1.3	Stabilizace napětí	30
5.1.4	Obvodové řešení řídicí jednotky.....	31

5.1.5	Návrh desky plošných spojů	32
5.2	Ochrana elektroniky při pádu.....	33
5.3	Popis výsledné DPS	34
5.4	Dodatečné úpravy desky	35
6	Programová část.....	36
6.1	Firmware Multiwii	36
6.2	Komunikace s periferiemi	36
6.2.1	Serial Peripheral Interface - SPI	36
6.2.2	Inter-Integrated Circuit - I2C	37
6.2.3	Sběrnice USART	37
6.2.4	Multiwii Serial Protocol - MSP	38
6.2.5	Rádiové ovládání	38
6.3	Úpravy firmware	39
7	Závěr	42
	Bibliografie	44

Seznam obrázků

Obrázek 1 Roll, Pitch, Yaw [8].....	12
Obrázek 2 Model kvadrokoptéry	13
Obrázek 3 Vnitřní uspořádání válcového BLDC motoru [11]	17
Obrázek 4 Prostředí BLHeliSuite	19
Obrázek 5 Experimentální zjištění tahové síly motoru.....	20
Obrázek 6 Grafické znázornění závislosti tahu motoru na úrovni řízení PWM.....	21
Obrázek 7 Grafické znázornění závislosti tahu motoru na úrovni řízení PWM v okolí pracovního bodu	22
Obrázek 8 Grafické znázornění odběru proudu v závislosti na úrovni řízení PWM.....	22
Obrázek 9 GY-86 [19]	27
Obrázek 10 Blokové schéma zapojení kvadrokoptéry	29
Obrázek 11 Zapojení MCP16301/H	31
Obrázek 12 Zapojení lineárního stabilizátoru LD117AS33TR	31
Obrázek 13 Ochranný kryt pro řídicí desku.....	33
Obrázek 14 Popis výsledné řídicí desky	34
Obrázek 15 Komunikace pomocí SPI se třemi zařízeními [21]	37
Obrázek 16 Ukázka připojení zařízení na sběrnici I2C [22]	37
Obrázek 17 Komunikace pomocí USART mezi dvěma stanicemi.....	38
Obrázek 18 Nastavení pořadí motorů	39
Obrázek 19 Příklad nastavení jednotlivých motorů.....	39
Obrázek 20 Příklad přiřazení timerů pro piny ovládající motory	40
Obrázek 21 Definice FailSafe módu.....	40
Obrázek 22 Vytvořená kvadrokoptéra za letu	43

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 Odhadovaná váha kvadrokoptéry	25
Tabulka 4.2 Vybrané dostupné snímače	26
Tabulka 4.4 Rozsah a přesnosti MPU-6050	27

Seznam použitých zkratek

ABS	Materiál Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BLDC	Motor s elektronickou komutací (<i>Brushless DC</i>)
DC	Stejnoseměrný proud (<i>direct current</i>)
ESC	Elektrický kontrolér rychlosti (<i>Electronic speed control</i>)
GPS	Globální navigační systém (<i>Global Positioning System</i>)
I2C	Sériová sběrnice (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)
KV	Otáčky na volt
LiPo	Lithium-polymerový akumulátor
MEMS	Mikroelektronický mechanický systém (<i>Micro Electro Mechanical Systems</i>)
RISC	Architektura procesorů s redukovanou instrukční sadou (<i>Reduced Instruction Set Computing</i>)
SPI	Sériové periferní rozhraní (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
ÚAMT	Ústav automatizace a měřicí techniky
UAV	Bezpilotní letoun (<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)
USART	Synchronní / asynchronní sériové rozhraní USART (<i>Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter</i>)

1 ÚVOD

Za multirotory obvykle považujeme vícevrtulové létající stroje požívané až na výjimky jako bezpilotní letouny (UAV). Jako pilotované stroje se nepoužívají hlavně z důvodu použití většího počtu motorů než u vrtulníků klasické koncepce, což přináší nižší spolehlivost. Přesto lze najít i výjimky jako například Curtiss-Wright se strojem X-19A [1] nebo v dnešní době projekt volocopter.com. Naopak v oblasti UAV se těší multirotory velké oblibě, a to především díky své jednoduché konstrukci. Nyní nejpoužívanější koncepcí je quadcopter – čtyř vrtulový létající stroj. Tato konstrukce přináší kompromis mezi stabilitou a manévrovatelností a zároveň je dostatečně jednoduchá, s čímž souvisí i cena. Díky použití více motorů se snižuje zatížení jednotlivých rotorů, každý z motorů zároveň má při letu nižší kinetickou energii. Zmírňují se tedy následky kolize s okolními objekty. Pro ochranu bezpilotních letounů se často používají ochranné rámy nebo klece, které chrání jak létající stroj, tak jeho okolí.

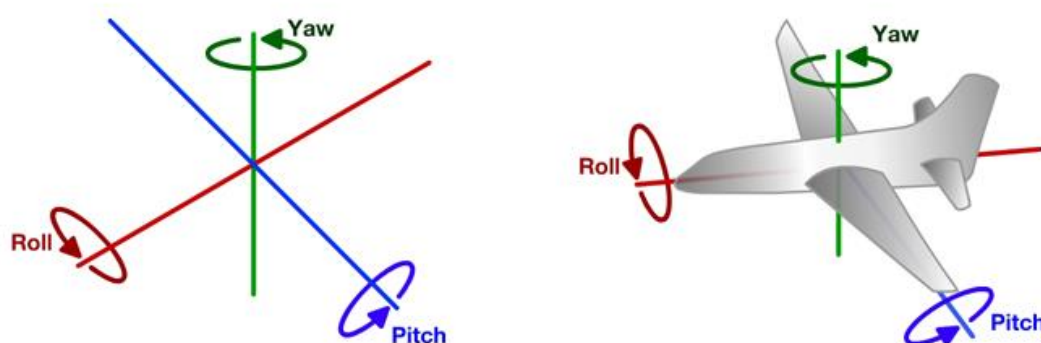
Použití UAV je opravdu široké. Lze je použít například k hlídání prostorů, průzkumu, vyhledání osob, přenosu nákladu a dalších. V komerční sféře jsou nejrozšířenější drony společnosti DJI. Drony využívá armáda, policie, záchranné složky, filmaři a mnoho dalších profesí. Proto lze v následujících letech očekávat další rozvoj této oblasti.

Bezpilotním letounům se věnuje řada literatury, například [1], [2], [3]. První z prací se zabývá především dynamikou čtyř vrtulového dronu. Druhá z uvedených prací je bakalářskou prací P. Gábrlíka zabývající se stavbou quadrotoru pro ústav automatizace Vysokého Učení Technického v Brně, a to hlavně z hlediska stabilizace a řízení letu. Třetí práce je taktéž bakalářská práce, úzce spojená s předchozí zmíněnou prací. Zabývá se návrhem řídicí a komunikační jednotky pro dron ÚAMT. Také na internetu lze nalézt spoustu zajímavých projektů. Za zmínku stojí například projekt na webu OPENELECTRONICS [4] nebo U.A.V.P [5]. Oba tyto projekty vyvíjejí opensource dron za rozumnou pořizovací cenu. Další zajímavý projekt lze nalézt na webu *instructables.com*. Jedná se o projekt francouzských studentů, kteří vytvářejí kvadrokoptéru ovládanou z platformy Raspberry Pi 2. [6]

Cílem této práce je navrhnout z hlediska snímačů řídicí desku pro stroj typu quadcopter, který bude schopný stabilizovat stroj při letu. Zároveň se předpokládá možnost připojení nadřazeného řídicího systému.

2 PRINCIP LETU KVADROKOPTÉRY

Quadrotor je létající prostředek se šesti stupni volnosti. Může tedy vykonávat posuvný pohyb ve všech směrech os X, Y a Z, zároveň může vykonávat i sférický pohyb, tedy rotaci kolem zmíněných os. V letectví (a v anglické literatuře obecně) se používá pro natočení kolem jednotlivých os používají termíny *roll*, *pitch* a *yaw*. Termín *roll* označuje rotaci kolem podélné osy x, označením *pitch* myslíme rotaci kolem příčné osy y a termínem *yaw* označujeme rotaci kolem svislé osy Z. [7]



Obrázek 1 Roll, Pitch, Yaw [8]

2.1 Model kvadrokoptéry

Existuje mnoho různých konstrukcí kvadrokoptér. Nejčastěji se ovšem setkáme s křížovou konstrukcí, kdy jeden je jeden z motorů umístěn ve směru letu. Tato konstrukce je označována jako *quadcopter+*. Další z možností je konstrukce označovaná jako *quadcopterX*. Jedná se také o křížovou kostru stroje, nicméně je, jak již název napovídá, natočena do X. Konstrukce typu X je výhodnější z hlediska možnosti lepšího umístění kamery. Naše kvadrokoptéra je konstrukce typu X.

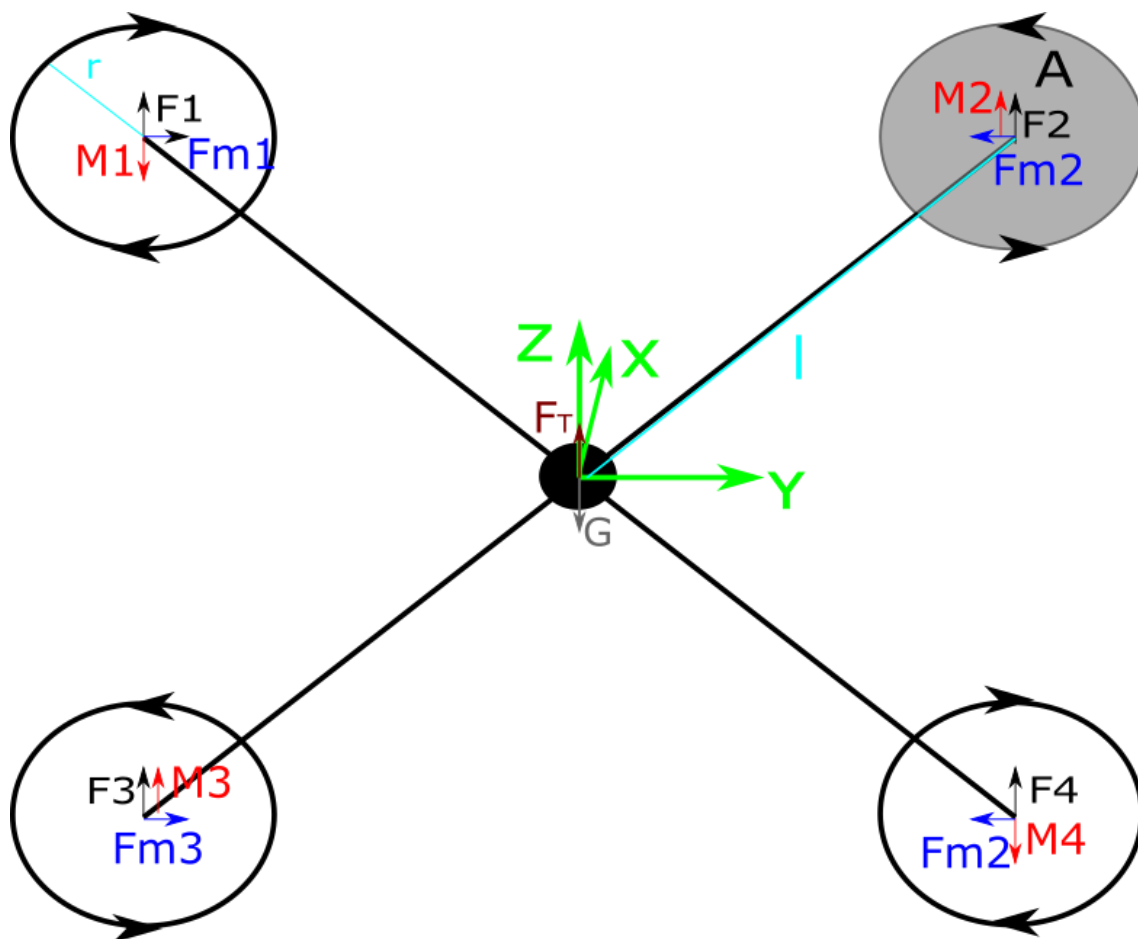
Pro návrh řídicí jednotky si musíme uvědomit, jaké síly na stroj působí a co vše potřebujeme měřit. Pro tento účel si vytvoříme zjednodušený model kvadrokoptéry.

Z literatury [1], [2], [9] vyplývá, že pokud zanedbáme rušivé veličiny jako vzdušné proudy, odpor vzduchu a další, můžeme si model kvadrokoptéry představit takto:

Každý z čtveřice motorů vytváří točivý moment \mathbf{M} , což má za následek otáčení jednotlivých vrtulí. V důsledku otáčení vrtulí vzniká tahová síla \mathbf{F}_T . Na rozdíl od vrtulníků se stroje těchto konstrukcí ovládají pouze změnou tahu jednotlivých vrtulí. Vzhledem k tomu, že každý z motorů vytváří točivý moment, je nutné tyto momenty kompenzovat, aby nedošlo k nechtěné rotaci kolem osy Z.

$$\sum \mathbf{M}_i = 0 \quad (1)$$

Z tohoto důvodu je použito dvou levotočivých a dvou pravotočivých vrtulí, jak je naznačeno na obrázku 2.



Obrázek 2 Model kvadrokoptéry

2.1.1 Posuvný pohyb v ose Z – stoupání a klesání

Pro změnu letové výšky udržujeme všechny motory na stejných otáčkách. Otáčením jednotlivých vrtulí vznikají takové síly $F_1 - F_4$, jejich vektorovým součtem získáme celkovou tahovou sílu F_T . Pokud je F_T větší než tíhová síla G , kvadrokoptéra začne stoupat. V opačném případě bude stroj díky působení tíhové síly klesat. Je zřejmé, že při rovnosti obou sil zůstane kvadrokoptéra „viset“ ve vzduchu – tento stav se nazývá v anglické literatuře *hover*.

$$G = m \cdot g \quad (2)$$

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (3)$$

$$F_V = F_T - G \quad (4)$$

- G je tíhová síla [N]
- m značí hmotnost kvadrokoptéry
- g představuje gravitační zrychlení [ms^{-2}], pro létání v nižších nadmořských výškách lze předpokládat $g=9.81 \text{ ms}^{-2}$
- F_T je celková tahová síla motorů [N]
- F_i značí jednotlivé tahové síly motorů 1-4 [N]
- F_v je výsledná síla působící na kvadrokoptéru [N]

Podle předchozích vztahů můžeme rámcově odhadnout zrychlení, které bude kvadrokoptéra schopna vyvinout. Toto zrychlení vypočítáme podle Newtonova druhého pohybového zákona.

$$F_v = m \cdot a \rightarrow a = \frac{F_v}{m} \quad (5)$$

- F_v je výsledná síla působící na kvadrokoptéru [N]
- m značí hmotnost kvadrokoptéry [g]
- a představuje zrychlení v ose Z [m/s^2]

2.1.2 Posuvný pohyb v osách X a Y – let dopředu a do boku

Obdobně lze popsat posuvný pohyb v osách X a Y. Pro tento pohyb se musí celá konstrukce naklonit, aby se tahová síla rozložila do dvou složek, jedné ve směru pohybu celého robotu, tedy do osy X nebo Y, a druhá ve vzhůru po ose Z. Potom lze pomocí rozkladu sil spočítat jednotlivé složky sil.

2.1.3 Otáčení kolem osy X a Y

Při otáčení kolem os X či Y (*Roll*, *Pitch*) koná kvadrokoptéra sférický pohyb. Příslušné dvojice motorů sníží své otáčky a druhá dvojice své otáčky zvýší. Každá dvojice motorů nyní vytváří různé momenty síly, v jejich důsledku se celá konstrukce kvadrokoptéry začne naklánět.

$$M = F \cdot l \quad (6)$$

Pro rotaci kolem osy Y platí:

$$M_y = ((F_1 + F_2) - (F_3 + F_4)) \cdot l \quad (7)$$

Obdobně pro rotaci kolem osy X můžeme říci:

$$M_x = ((F_1 + F_3) - (F_2 + F_4)) \cdot l \quad (8)$$

- M moment síly [Nm]
- M_i moment síly na jednotlivých ramenech kvadrokoptéry [Nm]

- M_X, M_Y moment síly v ose X, Y [Nm]
- l je vzdálenost od osy otáčení [m]

Moment setrvačnosti lze podle literatury [5] vyjádřit jako

$$I = \int r^2 dm \quad (9)$$

Pokud si však celý stroj představíme jako soustavu pěti hmotných bodů, můžeme předchozí vztah přibližně přepsat do následující podoby:

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad (10)$$

- m_i je hmotnost hmotného bodu [kg]
- r_i je vzdálenost hmotného bodu od těžiště [m]

Úhlové zrychlení ε získáme jako podíl momentu síly a příslušného momentu setrvačnosti.

$$\varepsilon_x = \frac{M_x}{I_x} \quad (11)$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_y}{I_y} \quad (12)$$

- $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ je úhlové zrychlení v ose X, Y [$^\circ/s$]
- M_X, M_Y moment síly v ose X, Y [Nm]

2.1.4 Otáčení kolem osy Z

Rotace kolem osy Z vzniká v důsledku reakčních momentů točících se vrtulí. Prakticky pro *yaw* musíme zvýšit tah motorů otáčející se v jednom směru. Podle rovnice (1) nebude docházet k rotaci, bude-li výsledný reakční moment, respektive součet všech reakčních momentů nulový. V opačném případě bude kvadrokoptéra rotovat kolem osy Z, tedy měnit kurz.

Jak již bylo řečeno, stroje těchto konstrukcí se ovládají pouze změnou tahů jednotlivých vrtulí. Vzhledem k tomu, že na kvadrokoptéru bude působit mnoho okolních vlivů, jako například vzdušné proudy, a ani tah všech ramen nebude nikdy úplně stejný z důvodu výrobních nepřesností, je pro člověka velice obtížné ovládat celou kvadrokoptéru pouze ručním ovládáním motorů. Z tohoto důvodu má drtivá většina kvadrokoptér řídicí desku, která se stará o stabilizaci letu.

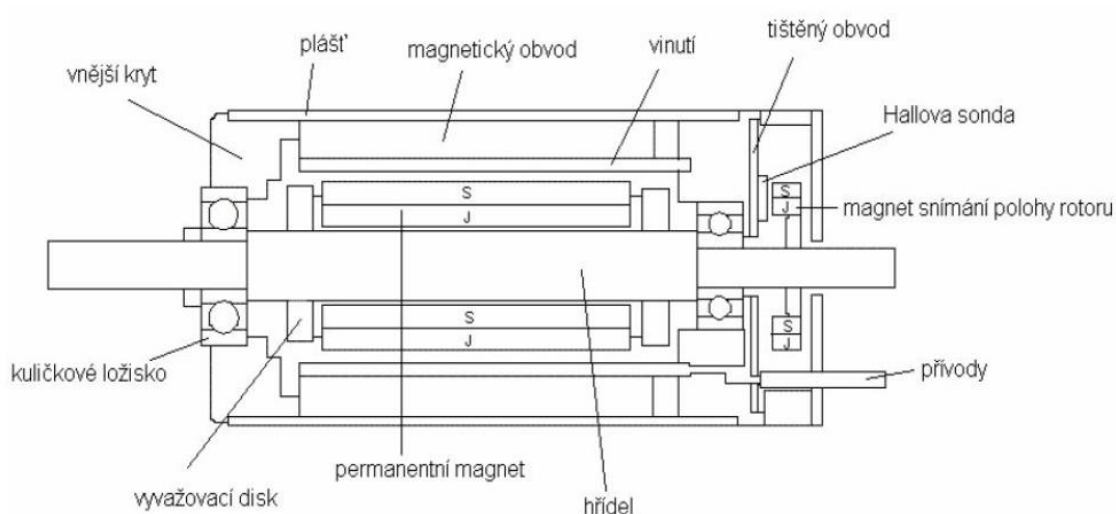
3 MOTORY PRO MALÉ LETECKÉ STROJE

V oblasti multicopterů se nyní nejčastěji používají bezkomutátorové DC motory neboli BLDC (Brushless DC motor). Jedná se o synchronní motory, které pro komutaci nepoužívají mechanické kartáče. Komutace je zde prováděna pomocí frekvenčních měničů, které převádí vstupní stejnosměrné napětí na střídavý signál na jednotlivá vinutí BLDC motoru v závislosti na poloze rotoru [10]. Proto je nutné znát polohu rotoru, což je prováděno nejčastěji pomocí snímače s Hallovou sondou. Výhody BLDC motorů oproti klasickým motorům s mechanickým komutátorem jsou tichý chod, větší životnost a vyšší otáčkový rozsah. Hlavní výhodou BLDC motorů jsou však jejich malé rozměry a vysoká účinnost.

3.1 Princip bezkomutátorových motorů

BLDC motory jsou konstruovány nejčastěji trojfázově, výjimkou však nejsou ani dvojfázová a jednofázová provedení. Provedení musí odpovídat i počty vinutí na statoru. Je možné setkat se s konstrukcí typu inrunner nebo outrunner. Konstrukce inrunner má rotor uvnitř statoru. Naopak outrunner má rotor, který obklopuje stator. Outrunner motory mají výhodu většího točivého momentu při nižších rychlostech otáčení. Další výhodou je, že se lépe chladí.

Střídavým signálem přiváděným na jednotlivá vinutí statoru pak dosáhneme otáčení magnetického pole, které je vytvářeno průchodem elektrického proudu vinutím statoru. Toto pole působí magnetickou silou na permanentní magnety na rotoru, což způsobí otáčení rotoru odpovídající otáčení magnetického pole vytvářeného statorem. [10], [11]



Obrázek 3 Vnitřní uspořádání válcového BLDC motoru [11]

Při výběru motoru je nutné dbát na jeho maximální odebíraný proud, pro jaké napájecí napětí je určen, s čímž souvisí i maximální příkon. Dalším důležitým parametrem jsou otáčky na volt (KV). Tento parametr udává počet otáček na volt při nulovém zatížení. Nižšímu KV prakticky odpovídají nižší otáčky a větší kroutící moment. Letným průzkumem trhu lze zjistit, že pro kvadrokoptéry určené pro akrobacii a závodní létání se používají motory s KV větším než 2000 otáček na volt. Pro ostatní jsou nejčastěji použity motory s KV v rozmezí 900-1300 otáček na volt.

Pro náš stroj byly vybrány motory Turnigy D3530/14 1100KV, které jsou shodné s projektem francouzských studentů [6]. Jedná se o motory konstrukce outrunner, které je možné napájet z dvou až čtyř článkové LiPo baterie.

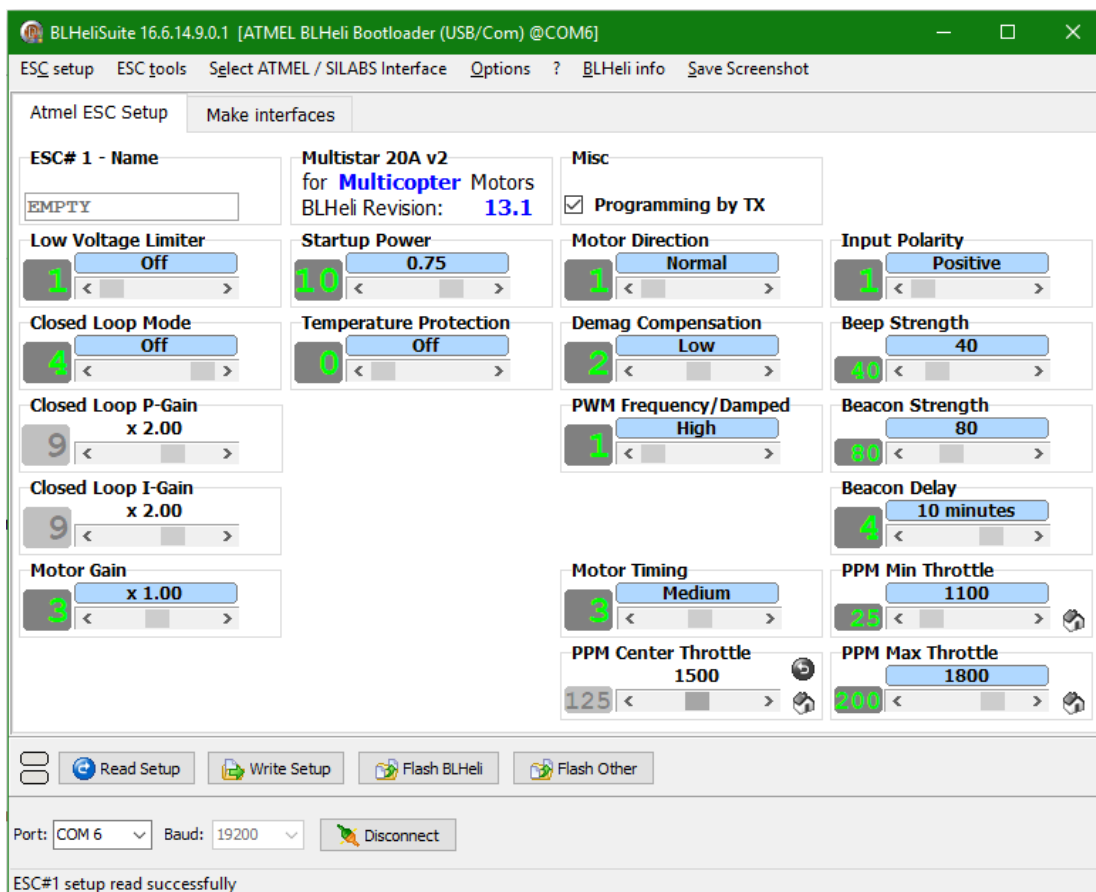
S výběrem motorů úzce souvisí i výběr vrtulí. Každý výrobce udává, jaké vrtule jsou vhodné pro konkrétní motor. Mezi modeláři se nejčastěji používají dvoulisté a třílisté. U vrtulí velmi závisí na její geometrii, obecně lze však říci, že s trojlistou vrtulí získáme větší tahovou sílu motorů při stejných otáčkách než s dvoulistou. S dvoulistou vrtulí však dosáhneme větší účinnosti, a tedy stroj poleťte déle. U vrtulí výrobce nejčastěji udává dva parametry, a to průměr vrtule v palcích a její stoupání, také v palcích. Tento parametr udává ve tvaru (průměr)x(stoupání). Důležitý parametr také je, zda je vrtule provedena jako levotočivá nebo pravotočivá.

Pro náš motor je podle výrobce vhodné při napájení z dvou článkové baterie použít vrtule s průměrem 8 palců a stoupáním 4 palce, tedy 8x4. Pro napájení z čtyř článkové baterie doporučuje použít vrtule 12x6. Vzhledem k tomu, že pro napájení je použita tříčlánková baterie, byly vybrány vrtule 9x4,7.

3.2 Řízení motoru – frekvenční měniče

Jak již bylo řečeno, u BLDC motorů se o komutaci stará frekvenční měnič neboli jak je v modelářské praxi nazýván ESC (Electronic Speed Controller). Frekvenční měniče běžně dostupné v modelářských potřebách komunikují s řídicí jednotkou nejčastěji pomocí standardního modelářského servo signálu. Jedná se o 1-2 ms trvající signál opakující se s frekvencí 50 Hz. Podle délky tohoto signálu se řídí otáčky motoru, přičemž 2ms dlouhý puls znamená maximální otáčky. Výjimkou však není ani řízení po sběrnici I2C či pomocí USART. Při výběru frekvenčního měniče je nutné zohlednit vlastnosti motoru, který má být pomocí ESC řízen, a to zejména proudovou zatížitelnost a provozní napětí.

Pro ovládání motorů byly vybrány Turnigy Multistar 30 Amp BLHeli Multi-rotor Brushless ESC 2-6S V2.0. Tyto ESC umožňují řídit motor s odběrem do 30 A. Lze je napájet z dvou až šesti článkové LiPo baterie. Jejich další výhodou je možnost přeprogramování pomocí software *BLHeliSuite*. V tomto prostředí lze naprogramovat například signál potřebný pro spuštění motorů, rozsah servo signálu a minimální napájecí napětí jako ochranu proti vybití baterie a spoustu dalších funkcí.



Obrázek 4 Prostředí BLHeliSuite

3.3 Tah motoru

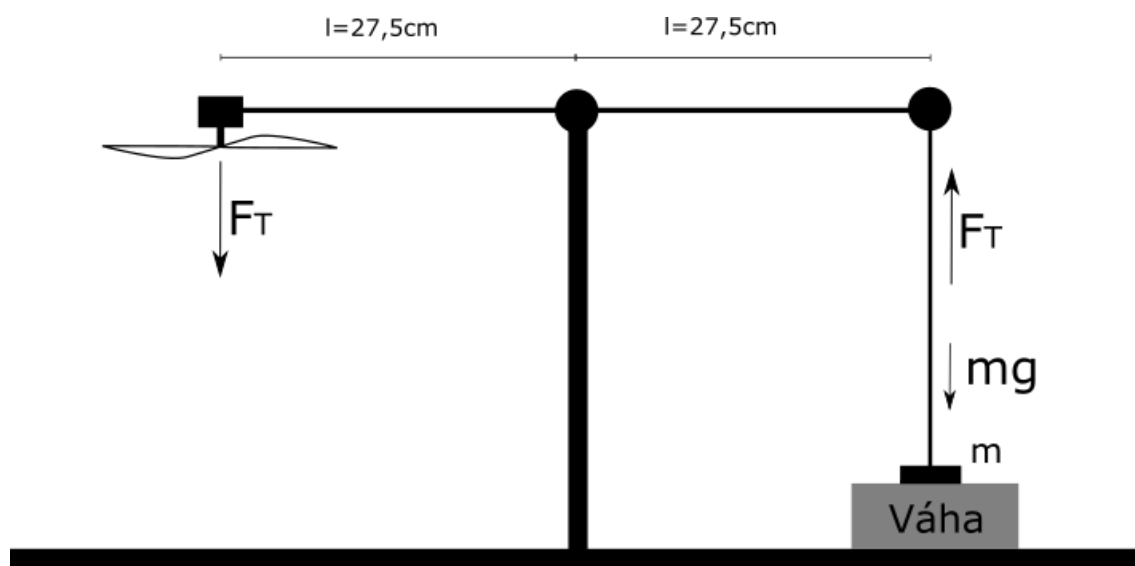
Tah motoru závisí nejen na parametrech motoru, ale i na použitých vrtulích a okolním prostředí. Podle literatury [1] lze tah motoru spočítat podle následující rovnice:

$$F_T = \frac{2\varphi A \kappa_t^2}{K_q^2} \cdot U^2 \quad (13)$$

- F_T je tahová síla motoru [N]
- φ je hustota vzduchu [kg/m^3]
- A představuje plochu, kterou zabírá otáčející se vrtule [m^2]
- κ_t představuje konstantu úměrnosti závislou na geometrii vrtulí
- K_q je podíl proudu procházejícího motorem a točivého momentu motoru
- U znázorňuje napětí na motoru [V]

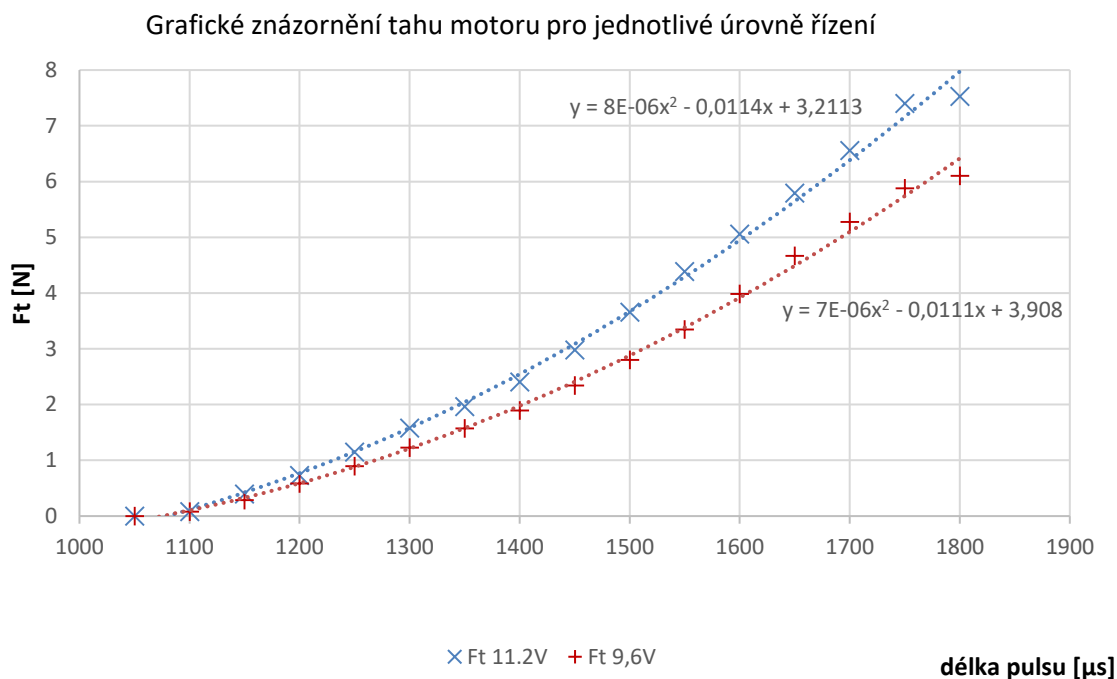
Jak je vidět z rovnice (13), tah motoru je velice těžké vypočítat. Proto je lepší tahovou sílu, kterou motor s konkrétní vrtulí vyvine, získat experimentálně. K tomuto experimentu byla použita konstrukce pro měření tahu vrtule, která se nachází na ÚAMT. Tato konstrukce je znázorněna na obrázku číslo 5. Využívá princip páky. Na jedné

straně je umístěn motor a na druhé straně páky je ve stejné vzdálenosti umístěno závaží, které je spojeno s digitální váhou. Zvyšováním otáček motoru se zvyšuje tahová síla vyvinutá motorem. Stejnou silou je na druhé straně nadzvedáváno závaží, což lze sledovat na digitální váze.



Obrázek 5 Experimentální zjištění tahové síly motoru

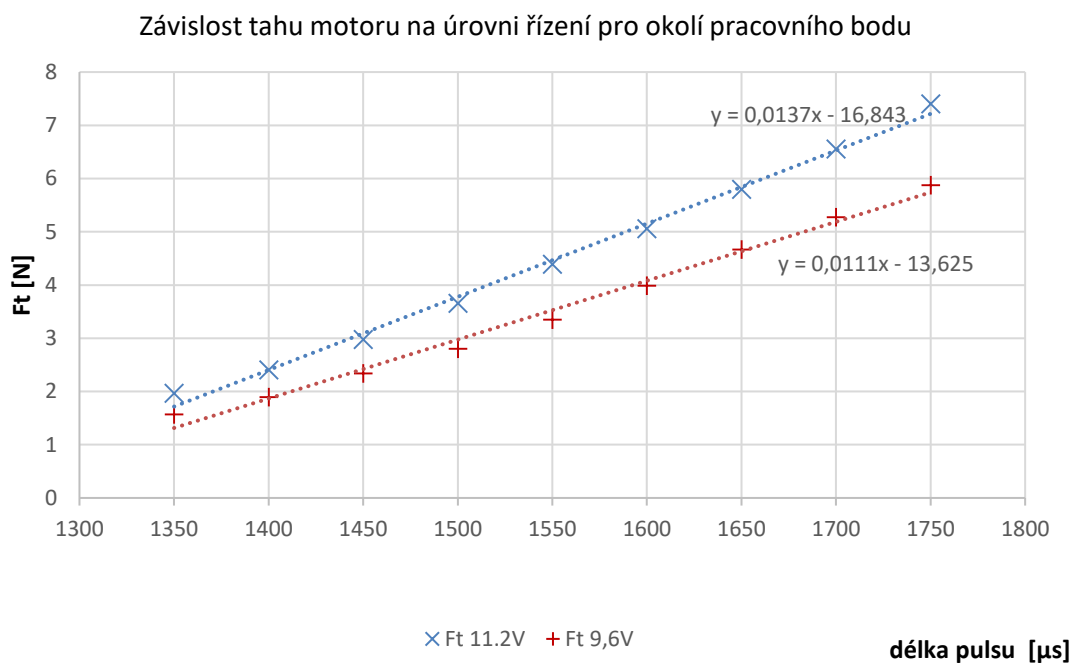
Měření tahu vrtule bylo provedeno pro dvě hodnoty napětí. První napětí 11,2 V odpovídá pracovnímu napětí na baterii. Druhé napětí 9,6 V je nejnižší napětí, které je vhodné pro provoz. Kromě tahu motoru byl měřen i odebíraný proud. Naměřená data jsou tabelována v příloze A. Grafické znázornění je zobrazeno na obrázku 6.



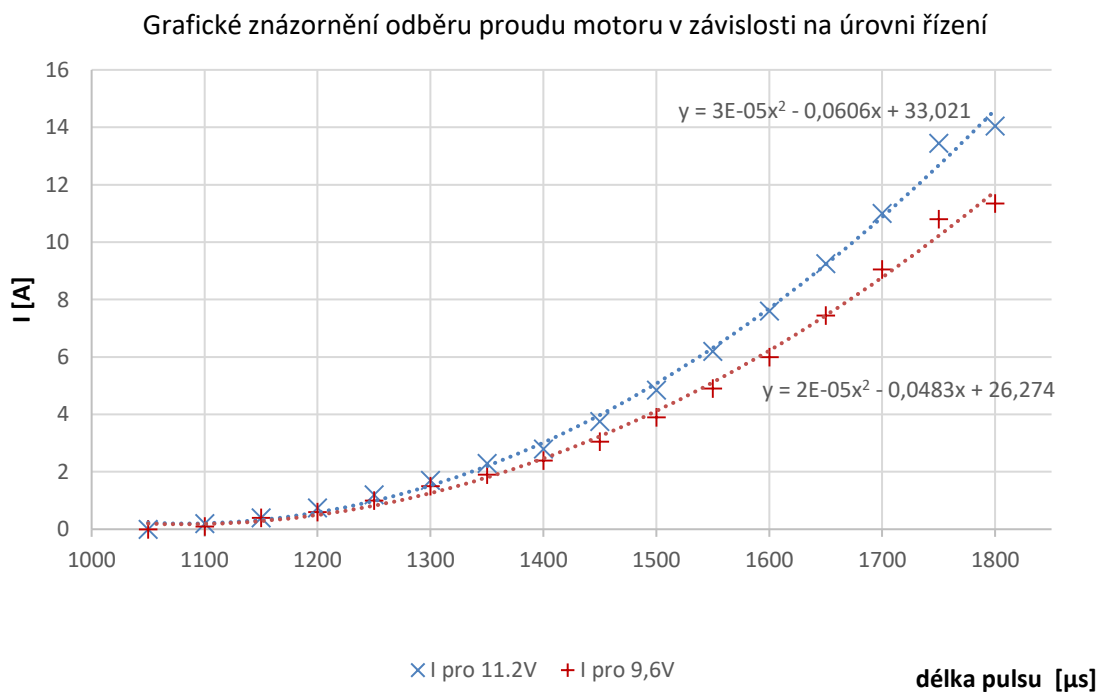
Obrázek 6 Grafické znázornění závislosti tahu motoru na úrovni řízení PWM

Naměřené hodnoty byly aproximovány polynomem druhého řádu. Pokud budou vynechány krajní hodnoty, lze závislost aproximovat pomocí přímky. Předpokládá se, že právě v této oblasti se bude tah jednotlivých motorů za běžného letu pohybovat. Lineárně aproximovaná závislost tahu je zobrazena na obrázku 7. Je zřejmé, že s klesajícím napětím na baterii klesá i tahová síla motorů a zhoršují se letové vlastnosti.

Na obrázku č. 8 je vyobrazena závislost odběru proudu motoru na délce PWM modelářského servo signálu pro napětí 12 V a pro napětí 9,6 V. Také tyto závislosti byly aproximovány pomocí polynomu druhého řádu.



Obrázek 7 Grafické znázornění závislosti tahu motoru na úrovni řízení PWM v okolí pracovního bodu



Obrázek 8 Grafické znázornění odběru proudu v závislosti na úrovni řízení PWM

4 SNÍMAČE PRO STABILIZACI LETU

Vzhledem k počtu faktorů ovlivňujících let kvadrokoptéry se o stabilizaci letu stará mikrokontroler. Činí tak na základě údajů získaných pomocí senzorů. Pro získání náklonu se používají akcelerometry a gyroskopy. Pro získání údajů o letové výšce se využívají barometrické snímače a údaje z globálního navigačního systému jako jsou například GPS nebo Galileo. Pro menší výšky lze použít například ultrazvukový snímač. Dále je pro stabilizaci vhodné znát kurz robota. K tomuto účelu je využíváno magnetometrů.

4.1 Akcelerometr

Jedná se o senzor určený pro měření úhlového zrychlení v jedné ose. Proto se používá více akcelerometrů, vzájemně na sebe kolmých. Tím máme možnost měřit zrychlení ve více osách. Pomocí akcelerometrů lze zjistit náklon stroje, jelikož se všude na Zemi vyskytuje tíhové zrychlení přibližné hodnotě $9,81 \text{ m/s}^2$. Tato hodnota se však mírně liší v závislosti na geografické poloze, protože tíhové zrychlení obsahuje složku jak gravitačního zrychlení, tak odstředivého zrychlení. Pokud tedy použijeme tříosý akcelerometr, můžeme zjistit náklon stroje, protože výsledné zrychlení bude konstantní a rovno tíhovému zrychlení. Omezující podmínkou je případ, kdy těleso nezrychluje. Akcelerometry lze také využít pro zjištění směru pohybu stroje.

Zrychlení je definované jako druhá derivace polohy podle času:

$$a = \dot{v} = \ddot{x} \quad (14)$$

- a představuje zrychlení [m/s^2]
- v značí rychlost [m/s]
- x je označení polohy [m]

4.2 Gyroskop

Gyroskop slouží k měření úhlové rychlosti v jedné ose. Víceosé gyroskopy jsou vytvořeny více gyroskopy umístěnými vzájemně kolmo. Úhlová rychlost je definována jako derivace úhlu podle času:

$$\omega = \dot{\varphi} \quad (15)$$

- ω značí úhlovou rychlost [$^\circ/\text{s}$]
- φ představuje úhel [$^\circ$]

Integrací úhlové rychlosti tedy můžeme pomocí gyroskopu zjistit úhel natočení dronu.

4.3 Magnetometr

Magnetometry se používají pro výpočet azimutu – odchylky od severního pólu Země. Slouží tedy k navigaci. Azimut je vypočítán na základě měření intenzity vektoru magnetického pole Země. Využívá se zde magnetorezistivní jev, a tedy změny odporu magnetického materiálu vlivem magnetického pole. Dále se používají magnetometry založené na magneto-galvanických principech, které využívají Hallova jevu.

4.4 Barometr

Barometrický snímač tlaku je se používá pro určení výšky, ve které se dron pohybuje. Měří se atmosférický tlak, který se vzrůstající výškou klesá. Výšku lze vypočítat podle Laplaceova barometrického vzorce [12]:

$$\Delta h_{AB} = K \log\left(\frac{p_{bA}}{p_{bB}}\right) \cdot (1 + \alpha t) \cdot g \quad (16)$$

- Δh_{AB} představuje výškový rozdíl mezi body A a B [m]
- K je konstanta závislá na geografické poloze (18411 pro střední Evropu)
- p_A, p_B značí tlaky v hladině A a B [Pa]
- α představuje koeficient teplotní roztažnosti vzduchu (1/273,15)
- t je průměrná teplota vzduchu mezi body A a B [°C]
- g představuje změnu gravitačního zrychlení v závislosti na zeměpisné šířce a výšce.

Vzhledem ke složitosti tohoto vzorce se používá Babinetův vzorec (17), který platí v blízkosti normálního atmosférického tlaku.

$$\Delta h_{AB} = 16000 (1 + 0,004t) \cdot \frac{p_A - p_B}{p_A + p_B}; p_0 \geq p_1 \quad (17)$$

4.5 Ultrazvukový snímač

Ultrazvukový snímač vzdálenosti se používá k určení letové výšky na malé vzdálenosti. Je tedy vhodný pro stabilizaci letu nízko nad zemí nebo pro autonomní přistávání. Ultrazvukové snímače vzdálenosti pracují na principu generování ultrazvukové vlny, která se šíří prostorem a pokud narazí na překážku, odrazí se a vrací se zpět k snímači. Vzdálenost je určena pomocí Dopplerova jevu nebo pomocí měření doby letu vyslané vlny. Pro generování ultrazvukové vlny se většinou využívá piezoelektrického jevu.

4.6 Odhad potřebného rozsahu snímačů

Před samotným výběrem snímačů je potřeba zjistit, v jakém rozsahu se přibližně budou pohybovat jednotlivé měřené veličiny. Pomocí jednoduchého matematického modelu kvadrokoptéry lze vypočítat maximální zrychlení a úhlové zrychlení. Pro tyto výpočty využijeme naměřené hodnoty získané při měření tahu motoru při napětí 11,2 V. Zároveň je nutné získat celkovou váhu stroje, proto byl proveden odhad celkové váhy kvadrokoptéry.

Tabulka 4.1 Odhadovaná váha kvadrokoptéry

Součástka	m [g]	Počet	m _c [g]
Turnigy D3530/14 1100KV, unašeč, vrtule, vč. kabelů a podložky	95	4	380
Turnigy Multistar 30 Amp BLHeli Multi-rotor Brushless ESC 2-6S V2.0	35	4	140
Turnigy 5000mAh 3S 25C Lipo Pack	412	1	412
Hobbyking SK450 Glass Fiber Quadcopter Frame 450mm	300	1	300
Odhadovaná váha řídicí desky	48	1	48
Odhadovaná váha kvadrokoptéry			1280

Pro výpočet maximálního zrychlení byl použit vztah z rovnice 5. Byla uvažována situace, kde stroj stojí a všechny čtyři motory skokově přejdou na největší možný výkon. Jedná se tedy o posuvný pohyb v ose Z.

Velikost tahové síly F_T , vytvořené otáčením motorů, při uvažování tahu jednotlivých motorů $F_i = 7,524\text{N}$ je:

$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 4 \cdot 7,524 \cong 30,0971\text{ N} \quad (18)$$

Proti síle F_T působí tíhová síla G :

$$G = m \cdot g = 1,28 \cdot 9,81 \cong 12,5568\text{ N} \quad (19)$$

Výsledná síla F_v působící na kvadrokoptéry je tedy:

$$F_v = F_T + G = 30,0971 - 12,5568 = 17,5403\text{ N} \quad (20)$$

Nyní již podle rovnice 5 můžeme určit maximální zrychlení kvadrokoptéry.

$$a = \frac{F_v}{m} = \frac{17,5403}{1,28} = 13,7033 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cong 1,4\text{ g} \quad (21)$$

Pro výpočet maximálního úhlového zrychlení použijeme vztahu z rovnice 11. Úhlové zrychlení v ose x a ose y bude vzhledem k symetrické konstrukci stejné. Obdobně jako při výpočtu maximálního zrychlení uvažujeme situaci, kdy je stroj

v klidové poloze a motory na jedné straně skokově přejdou na nejvyšší výkon a zbylé dva motory skokově zastaví. Předpokládaná vzdálenost motorů od osy otáčení je 15 cm.

Moment síly můžeme vyjádřit rovnicí:

$$\begin{aligned} M_y &= ((M_1 + M_2) - (M_3 + M_4)) \cdot l = \\ &= ((7,524 + 7,524) - 0) \cdot 0,15 \cong 2,2573 Nm \end{aligned} \quad (22)$$

Moment setrvačnosti byl vypočten podle rovnice 10. Hmotnost hmotných bodů představující umístění motorů na ramenech kvadrokoptéry byla odhadnuta jako 120 g. Vzdálenost těchto bodů do těžiště je 22 cm.

$$I = \sum m_i r_i^2 = 4 \cdot (0,12 \cdot 0,22^2) \cong 0,02323 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \quad (23)$$

Nyní podle rovnice 11 bylo možné určit maximální úhlové zrychlení.

$$\varepsilon = \frac{M}{I} = \frac{2,2573}{0,02323} \cong 97,1626 \text{ }^\circ/\text{s} \quad (24)$$

Nyní je možné přistoupit k výběru konkrétních snímačů.

4.7 Výběr snímačů

Při výběru snímačů je nutné zohlednit zejména jejich přesnost a cenu. Při stavbě UAV je dále nutné zohlednit velikost snímače a jeho váhu. Dalším důležitým aspektem je způsob komunikace. Při průzkumu trhu je možné nalézt mnoho snímačů, přičemž některé disponují i procesory pro zpracování dat. Velmi častá je také kombinace více senzorů do takzvané IMU (Inertial measurement unit), které se se velmi často používají v leteckých prostředcích. Snímače byly vybrány podle použitého akcelerometru a gyroskopu, protože jsou to jediné opravdu důležité senzory pro stabilizaci letu. Protože řídicí deska bude pájena v amatérských podmínkách, bylo nutné zohlednit také velikost snímače nebo to, jestli se vyrábí jeho breakout board. Neméně podstatným kritériem také byla cena snímače. V tabulce 4.2 jsou shrnuty základní údaje o dostupných kombinovaných snímačích.

Tabulka 4.2 Vybrané dostupné snímače

Název	Obsahuje snímače	Komunikace	Ostatní	Cena [Kč]
Adafruit 9-DOF	tříosý gyroskop, akcelerometr a magnetometr	I2C	Breakout	650
ADIS16407BMLZ-ND	tříosý gyroskop, akcelerometr a magnetometr	SPI	Vlastní procesor	18 306
MinIMU-9 v5	tříosý gyroskop, akcelerometr a magnetometr	I2C	Breakout	510
UM7 Orientation Sensor	tříosý gyroskop, akcelerometr a magnetometr	UART, SPI	Vlastní procesor	5300
GY-86	tříosý gyroskop, akcelerometr a magnetometr + barometr	I2C	Breakout, DMP	350

Pro stabilizaci letu byla vybrána senzorická deska GY-86 a to zejména díky své nízké ceně a breakout board provedení, což usnadňuje pájení. Tato deska obsahuje jednotku MPU-6050, která je spojením tříosého akcelerometru a tříosého gyroskopu. Dále obsahuje tříosý magnetometr HMC5883L a barometrický snímač tlaku MS5611. Deska GY-86 umožňuje komunikaci pomocí sběrnice I2C. Její výhodou je nízká cena a kompatibilita s firmware Multiwii. Vzhledem k přesnosti barometru byl pro měření vzdálenosti od země při nízkých letových výškách vybrán ultrazvukový snímač SRF08.



Obrázek 9 GY-86 [19]

4.7.1 MPU-6050

MPU-6050 obsahuje tříosý MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) akcelerometr a gyroskop. Je schopen komunikace pomocí I2C sběrnice. Jak gyroskopu, tak akcelerometru lze programově nastavit rozsah. Snímač je schopen pracovat v teplotním rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Další výhodou MPU-6050 je integrovaný Digital Motion Processor, který umožňuje výpočet Eulerových úhlů a tím šetřit procesorový čas. V tabulce 4.4 jsou tabelovány rozsahy a přesnosti pro MPU-6050. [13]

Tabulka 4.3 Rozsah a přesnosti MPU-6050

Rozsah gyroskopu	Citlivost gyroskopu	Rozsah akcelerometru	Citlivost akcelerometru
[$^{\circ}/\text{sec}$]	[LSB/($^{\circ}/\text{sec}$)]	[g]	[LSB/g]
± 250	131	± 2	16384
± 500	65.5	± 4	8192
± 1000	32.8	± 8	4096
± 2000	16.4	± 16	2048

4.7.2 HMC5883L

Třiosý magnetometr HMC5883L od firmy Honeywell obsahuje 12bit AD převodník, díky kterému umožňuje měřit azimut s tolerancí od 1 do 2° na rozsahu od ± 1 gauss až ± 8 gauss. Výrobce v datasheetu [14] udává maximální citlivost snímače jako 1370 LSB/gauss a minimální citlivost jako 230 LSB/gauss. Snímač umožňuje měření od -30 °C do 85 °C. Zároveň je snímač schopný komunikace po sběrnici I2C

4.7.3 MS5611

Barometrický snímač tlaku MS5611 je dílem firmy TE Connectivity. Rozsah měření je od +10 mbar do 1200 mbar. Výrobce udává maximální chybu $\pm 2,5$ mbar. Senzor obsahuje 24 bitový AD převodník. Tento senzor lze použít v teplotním rozsahu od -40 °C do +85 °C. Senzor komunikuje po sběrnici I2C. [15]

4.7.4 SRF08

Bezkontaktní ultrazvukový snímač vzdálenosti SRF08 měří vzdálenost v rozsahu od +3 cm do +6 m. Výrobce udává maximální chybu 3-4 cm. Senzor je napájen 5 V s typickým proudovým odběrem 3 mA. Komunikace probíhá po sběrnici I2C. [16], [17]

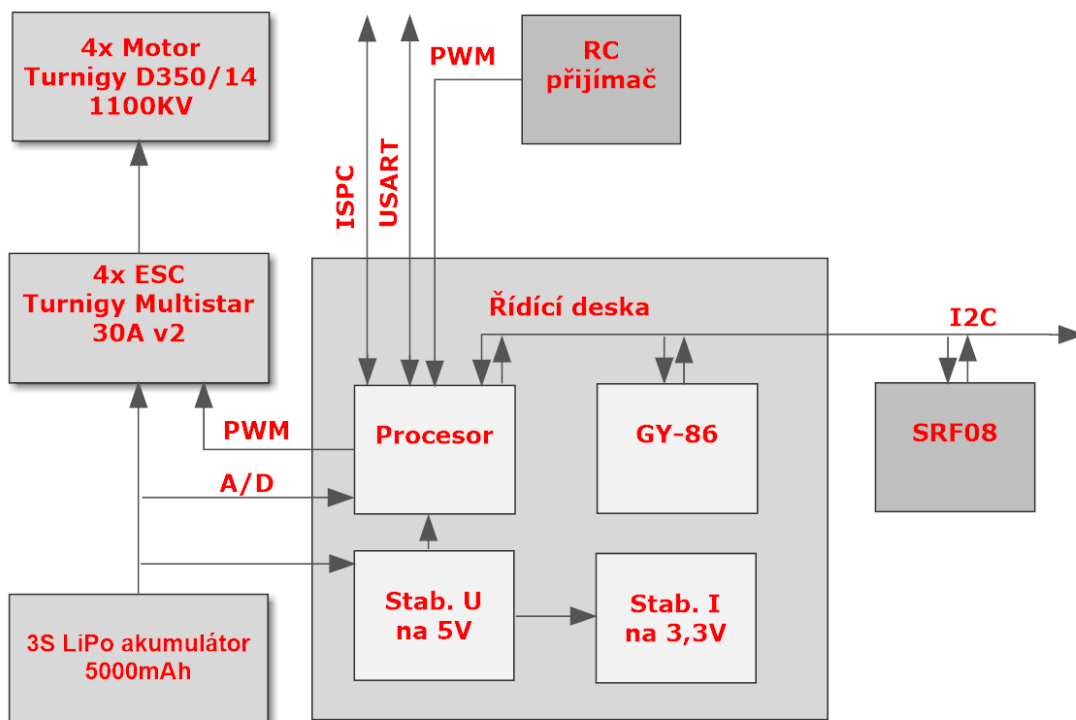
5 KONSTRUKCE

5.1 Návrh řídicí desky

Řídicí jednotka musí být schopná zpracovat signály ze snímačů a modelářské vysílačky a měřit napětí na baterii, aby nedošlo k jejímu přílišnému vybití, což by mělo za následek její zničení a pád celého stroje. Podle změřených údajů musí být schopna regulace motorů a zároveň komunikace s nadřazeným systémem. Dalším požadavkem na řídicí desku je její snadná rozšiřitelnost a co možná nejmenší hmotnost.

5.1.1 Blokové schéma zapojení

Obrázek 10 znázorňuje blokové schéma zapojení kvadrokoptéry. Napájení z tříčlánkového LiPo akumulátoru je rozvedeno k frekvenčním měničům, které dále napájejí motory. Napájecí napětí dále napájí řídicí desku, kde je postupně stabilizováno na 5 V a 3,3 V. Napájecím napětím 5 V je také napájen procesor, který se stará o komunikaci se snímači po sběrnici I2C a ostatními připojenými zařízeními. Procesor také přijímá signály z RC přijímače a obstarává ovládání motoru díky komunikaci s frekvenčními měniči.



Obrázek 10 Blokové schéma zapojení kvadrokoptéry

5.1.2 Mikrokontroler ATmega 2560

Při výběru mikroprocesoru musí být zohledněn jak jeho výkon, tak jeho váha a proudový odběr. Další neméně podstatnou vlastností vybraného mikrokontroleru je možnost komunikace s periferiemi a důležitým parametrem je také jeho pořizovací cena.

Pro řízení letu kvadrokoptéry byl vybrán mikroprocesor ATmega 2560 od firmy Atmel. Tento procesor je znám svým použitím na obecně známe platformě Arduino. Mezi jeho přednosti patří kromě rozsáhlé komunity kolem Arduina také nízká cena a kompatibilita s firmware Multiwii.

Jedná se o 8-bitový RISC procesor vybavený 256 kB flash pamětí a 8 kB RAM, který může pracovat s frekvencí až 16 MHz. Tento procesor může být napájen napětím 4,5 V – 5,5 V. [18]

Procesor je také vybaven 10-bitovým A/D převodníkem s multiplexorem. Pro něj lze využít interní referenční napětí 2,56V nebo napětí přivedené na pin AREF. Tento A/D převodník je byl použit pro měření napětí na baterii.

Pro komunikaci s periferiemi lze využít analogové nebo digitální vstupně výstupní piny, z nichž šestnáct může být použito pro PWM. Nechybí ani sběrnice I2C, SPI v režimu *master* nebo *slave*, či čtveřice USART portů. Dále také obsahuje čtveřici šestnáctibitových časovačů/čítačů a dvojici osmibitových časovačů/čítačů. Dalším důležitým parametrem jsou zdroje interního i externího přerušení.

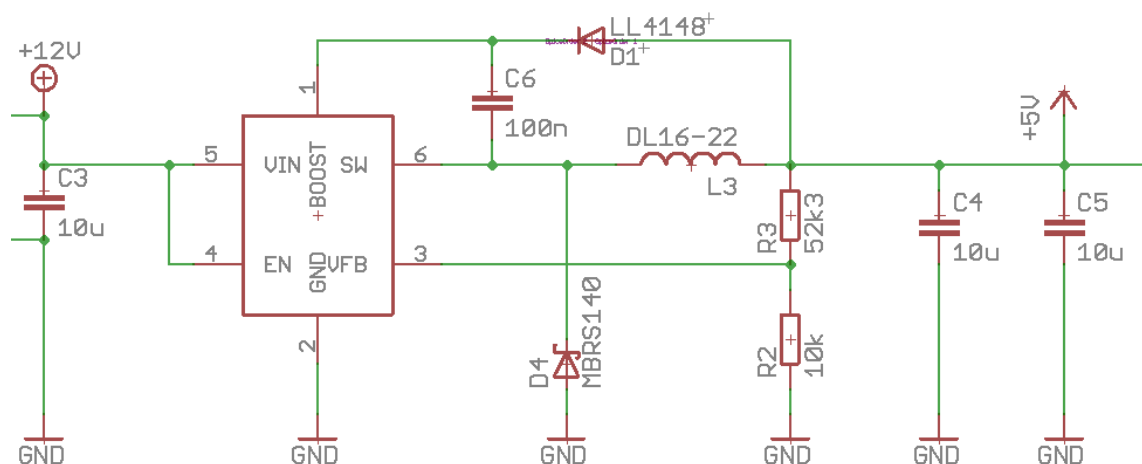
5.1.3 Stabilizace napětí

Kvadrokoptéra je napájena z tříčládkové LiPo baterie. Jednotlivé články baterie mají napětí 3,7 V a jejich sériovým spojením dostáváme 11,1V. Tímto napětím jsou napájeny frekvenční měniče a motory. Elektronika na řídicí desce však přímo tímto zdrojem napájena být nemůže, protože všechna zařízení na ní snesou maximálně 5,5 V. Proto napětí dodávané akumulátorem musí být sníženo a stabilizováno. K tomuto účelu byly vybrány dva stabilizátory s výstupním napětím 5 V, respektive 3,3 V.

Pro snížení a stabilizaci napájecího napětí z tříčládkové LiPo baterie na 5 V byl vybrán step-down spínaný stabilizátor MCP16301/H od firmy Microchip. Na vstup tohoto spínaného zdroje lze přivést napětí 4-36 V. Jeho výstupní napětí je možné nastavit v rozsahu od 2 do 15 V. Maximální výstupní proud je 1 A. Výrobce udává [19] dvouprocentní přesnost výstupního napětí.

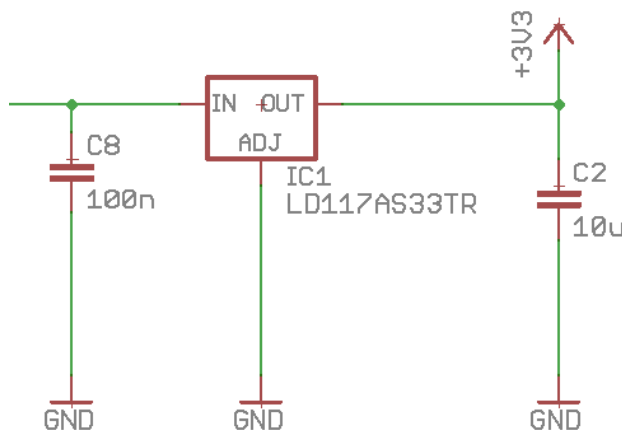
Výstupní napětí je nastaveno pomocí dvojice rezistorů, které spolu tvoří napěťový dělič. Napětí upravené děličem je poté přivedeno na pin VFB. Pro stabilizaci výstupního napětí na 5 V byla podle doporučení datasheetu použita dvojice rezistorů R2 a R3 s jmenovitým odporem $R2 = 10\text{ k}\Omega$ a $R3 = 52,3\text{ k}\Omega$. Dioda D4 tvoří spolu s tlumivkou L3 a kondenzátory C4 a C5 výstupní filtr. Kondenzátor C3 slouží k filtraci

vstupu stabilizátoru. Kondenzátor C6 slouží pro nastavení optimální regulace. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 11.



Obrázek 11 Zapojení MCP16301/H

Pro stabilizaci napětí z 5 V na 3,3 V byl vybrán lineární low dropout stabilizátor LD117AS33TR. Výstupní napětí tohoto stabilizátoru je 3,3 V a nelze je měnit. Maximální výstupní proud je 800 mA. Výrobce [20] udává přesnost výstupu s chybou 1% při 25 °C a maximálně 2% při plném teplotním rozsahu (do 150 °C). Zapojení tohoto stabilizátoru nevyžaduje mnoho součástek, stačí dva filtrovací kondenzátory.



Obrázek 12 Zapojení lineárního stabilizátoru LD117AS33TR

5.1.4 Obvodové řešení řídicí jednotky

Deska je napájena pomocí napětí 12 V dodávaného tříčlánkovou LiPo baterií. Vzhledem k tomu, že veškerá elektronika je napájena maximálně 5,5 V, je nutné toto napětí snížit.

K tomu je použit spínaný stabilizátor MCP16301/H. Přestože veškerá elektronika na desce komunikuje v 5 V logice, byl přidán stabilizátor napětí na 3,3 V od firmy STMicroelectronics. Toto napětí je zde z důvodu možnosti pozdějšího rozšíření o senzory pracující na 3,3 V logice přes USART.

Napájení mikroprocesoru ATmega 2560 je zajištěno pěti blokovacími kondenzátory o velikosti 100 nF. Jedná se o kondenzátory C9 až C13. O takt procesoru se stará krystal Q1 s frekvencí 16 MHz, který je připojen mezi piny XTAL1 a XTAL2 v paralelním zapojení s kondenzátory C1 a C7.

Jak již bylo řečeno, pro měření napětí na baterii byl využit desetibitový AD převodník integrovaný v procesoru. Napětí z baterie je sníženo pomocí odporového děliče, jenž je vytvořen pomocí dvojice rezistorů R6 a R7. Toto napětí je poté přivedeno na pin AREF procesoru.

Pro programování mikroprocesoru slouží ISPC sběrnice, tedy piny: MISO, MOSI, CSK, RESET, napájení 5 V a zem.

Aby byla deska snadno rozšiřitelná o další periferie, byly vyvedeny sběrnice SPI a I2C. Ke sběrnici I2C jsou připojeny rezistory R1 a R5, které zajišťují vysokou úroveň napětí na sběrnici v době, kdy neprobíhá přenos dat. Dále byly vyvedeny čtyři USART porty, z nichž dva byly přizpůsobeny pro komunikaci se zařízeními podporující 3,3 V logiku, a to pomocí děličů napětí tvořených rezistory R8-R11. Komunikace se senzorickou deskou GY-86 je zajištěna pomocí sběrnice I2C, tedy piny SDA, SCL, napájení a zem.

Připojení přijímače pro modelářskou vysílačku je realizováno pomocí vyvedení osmi pinů a to PK0-PK7. Tyto piny jsou schopné PWM a mohou vyvolat přerušení. Pro ovládání motorů jsou vyvedeny piny PH3, PH4, PH5 a PH6. Ke všem těmto pinům je zároveň vyveden zemní signál tak, aby mohly být připojeny právě čtyři frekvenční měniče, které budou ovládat otáčky motorů. Ke konektorům pro vysílačku je navíc přivedeno napětí 5 V, které slouží pro napájení přijímače RC signálu.

Schéma zapojení řídicí desky je přiloženo jako příloha B.

5.1.5 Návrh desky plošných spojů

Návrh výsledné desky plošných spojů řídicí jednotky byl proveden v programu EAGLE 7.7.0. Výsledkem je jednostranná deska o rozměrech 60 mm x 60 mm. Obrazec plošných spojů byl vyfrézován na fríze ÚAMT. Na desce se nacházejí čtyři montážní otvory, které jsou od sebe vzdáleny 50 mm.

Všechny součástky kromě krystalu jsou typu SMD a jsou umístěny na spodní straně desky. Konektory a krystal jsou umístěny na vrchní straně. Obrazec plošných spojů je také na spodní straně desky. Všechny vodiče vedené ve vrstvě TOP jsou provedeny jako drátové propojky. Šířky jednotlivých vodičů jsou 0.254 mm (10 mil)

pro signálové vodiče a 0.6096 mm (24 mil) pro napájecí vodiče. Zemní signál je vytvořen pomocí rozlévané mědi. Tato souvislá zemní plocha je však vyříznuta pod senzorickou deskou GY-86. Pod touto deskou vede minimum vodičů, protože se na desce nachází magnetometr, který by mohl být ovlivněn signálem z těchto vodičů.

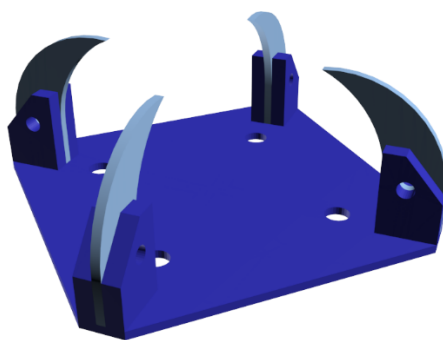
Při návrhu desky plošných spojů bylo dbáno na snadný přístup ke konektorům pro motory a vysílačku. Výstup sběrnice I2C je umístěn hned vedle senzorické desky GY-86 tak, aby sběrnice byla co nejkratší. Konektor sběrnice ISPC je vytvořen tak, aby byl kompatibilní se standartními ISPC programátory jako je například AVR Dragon od firmy Atmel. Vedle tohoto konektoru je vyveden pin SS pro SPI sběrnici, jelikož SPI sběrnice používá některé piny z ISPC.

Blokovací kondenzátory byly umístěny tak, aby byly co nejblíže pouzdru procesoru, aby byly eliminovány rychlé pulsní odběry.

V příloze C je uveden seznam použitých součástek. V Příloze D jsou předlohy pro výrobu plošného spoje a v příloze E jsou připojeny osazovací plány DPS.

5.2 Ochrana elektroniky při pádu

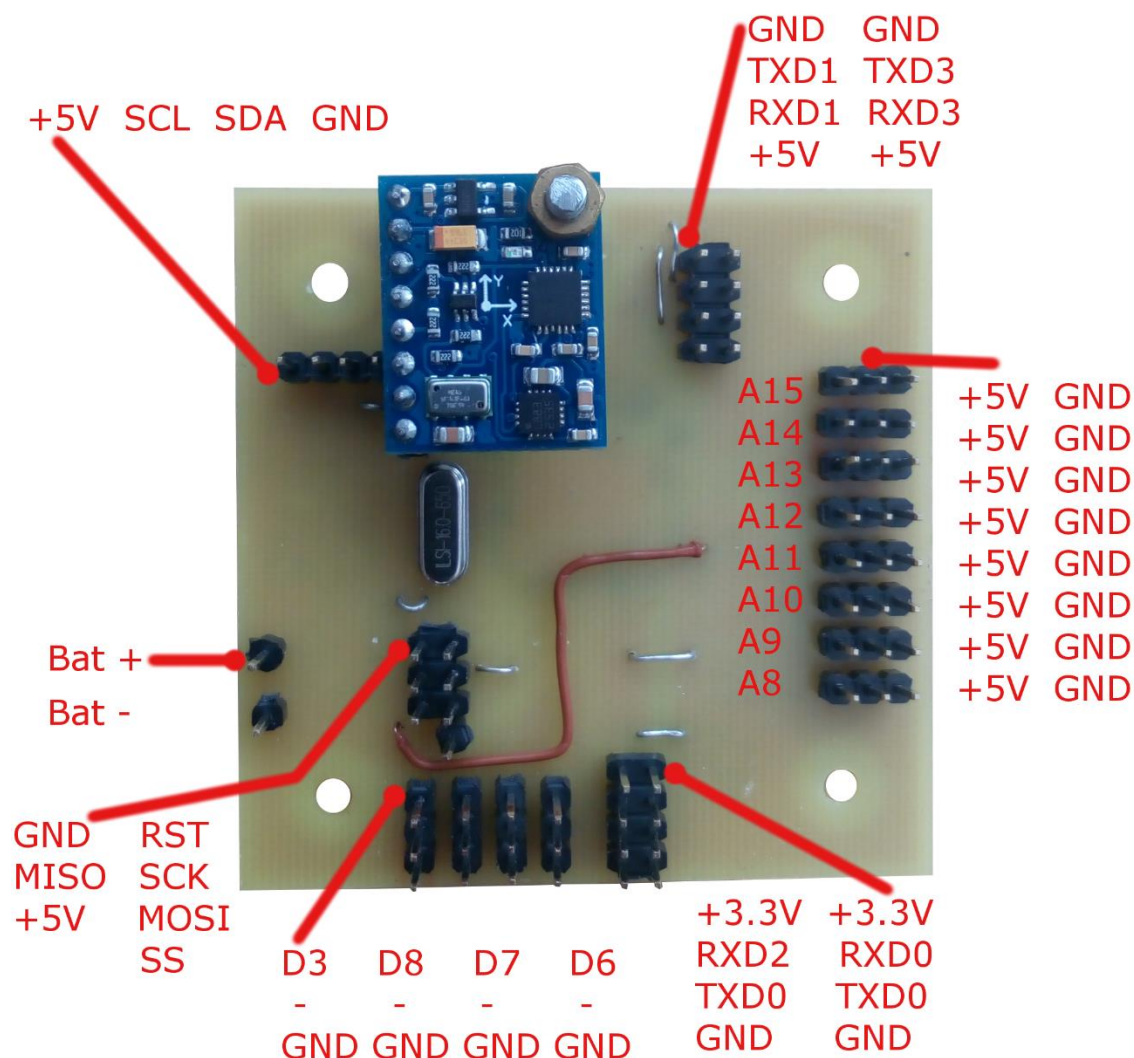
Vzhledem k tomu, že kvadrokoptéry mohou řídit i nezkušení piloti, byl navržen a vytvořen ochranný kryt pro řídicí desku. Jedná se o desku s rameny, na kterou se řídicí deska přišroubuje a poté se do podložky zasadí ramena, která desku chrání. Tato ochrana byla kompletně vytisknuta na 3D tiskárně z materiálu ABS. Mezi deskou plošných spojů a krytem je podložka z měkkého materiálu, která tlumí vibrace.



Obrázek 13 Ochranný kryt pro řídicí desku

5.3 Popis výsledné DPS

Na obrázku 14 jsou znázorněny vstupy a výstupy řídicí desky. Vlevo vedle senzorické desky GY-86 je vyvedena sběrnice I2C. Vpravo od senzorické desky je dvojice UART pracující v 5 V logice. V levé spodní části se nachází konektory pro napájení z tříčlánkové LiPo baterie. Vpravo od nich je vyvedena ISPC sběrnice pro programování desky a pin SS aby bylo možno používat SPI sběrnici. Na pravé straně desky je osmice pinů pro připojení osmi-kanálové modelářské vysílačky. Na pin A8 se připojuje signál *Throttle* (CH3), na signál A9 se připojuje signál *Roll* (CH1), pin A10 slouží pro připojení signálu *Pitch* (CH2), pin A11 slouží pro připojení signálu *Yaw* (CH4), zbylé piny slouží pro připojení signálů AUX, respektive ostatních kanálů. Každý z těchto pinů má svoje napájení a zem.



Obrázek 14 Popis výsledné řídicí desky

Ve spodní části desky se nachází čtveřice pinů pro připojení jednotlivých motorů. Pin D3 slouží pro připojení levého zadního motoru, na pin D8 se připojuje levý přední

motor. Pin D7 je určen pro pravý přední motor, a nakonec pin D6 je určen pro pravý zadní motor. Prostřední piny jsou slepé a piny nejbližší k okraji jsou pro zemní signál.

Vpravo od těchto pinů se nachází dvojice UART pracující na 3,3 V logice.

5.4 Dodatečné úpravy desky

Po vyrobení vodivého obrazce DPS bylo zjištěno, že není propojen pin 98 (AREF) a 100 (AVCC), respektive pin AVCC není připojen na 5 V, což bylo vyřešeno přizvednutím pinu 100 a jeho následným propojením s 5 V na nožičce kondenzátoru C13.

Dále bylo provedeno zaoblení rohů výsledné DPS upilováním okrajů desky z důvodu nepatrného snížení váhy a zlepšení designu desky.

Při testovacích letech bylo zjištěno, že osmibitový timer na pinu 18 (PH6), který ovládá motory nepracuje úplně správně, což způsobovalo pády kvadrokoptéry. Proto byl výstup pinu PH6 přepájen pomocí drátové propojky na pin 7 (PE5). Poté stačilo v programu upravit výstupní pin pro motor a problém byl vyřešen.

6 PROGRAMOVÁ ČÁST

6.1 Firmware Multiwii

Při vývoji kvadrokoptéry se předpokládalo použití opensource software pro řízení celého stroje. Jako vhodný opensource řídicí software byl zvolen program Multiwii.

Multiwii je univerzální software pro řízení RC modelů, umožňuje řízení různých druhů konstrukcí včetně multikoptér, letadel, vrtulníků, ale dokáže ovládat i gimbal. Tento software podporuje velké množství snímačů, přestože původně byl vytvořen pro snímače platformy Nintendo Wii. Zároveň byl původně napsán pro platformu Arduino.

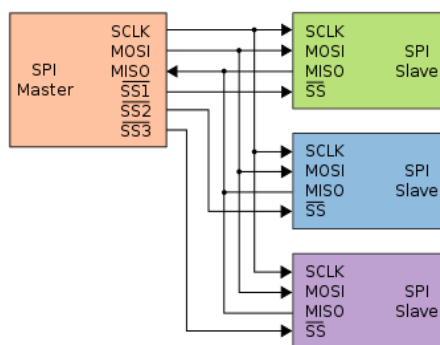
Software je napsán v jazyce C++, což je ideální pro možnosti rozšíření. Další jeho výhodou je rozsálá komunita, která se kolem Multiwii vytvořila. Multiwii podporuje mnoho módů letu, od akrobatického po stabilizovaný let, kdy může stroj řídit i naprostý amatér. Zároveň je umožněna komunikace s nadřazeným systémem pomocí Multiwii Seriál Protocol.

6.2 Komunikace s periferiemi

Velmi důležitou vlastností desky je možnost komunikovat s okolními zařízeními, k tomuto účelu bylo vyvedeno několik komunikačních sběrnic.

6.2.1 Serial Peripheral Interface - SPI

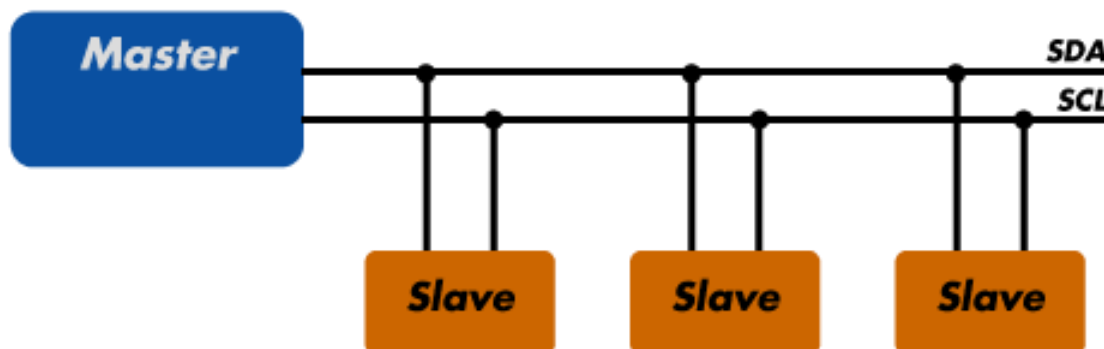
SPI je sériové plně duplexní komunikační rozhraní, které se používá pro komunikaci mikroprocesoru s periferním zařízením. Sběrnice pracuje v režimu Master-Slave. Zařízení master vybírá aktivní zařízení pomocí pinu SS – Slave Select. Tedy v jeden okamžik může master komunikovat pouze s jedním zařízením. Pokud master vybere zařízení, se kterým chce komunikovat, začne generovat hodinový signál na vodiči SCK. Poté mohou zařízení posílat svoje data po vodičích MOSI (Master Out Slave In) a MISO (Master In Slave Out). Pro ukončení komunikace se zařízením master přestane vysílat hodinový signál a zruší výběr pomocí SS.



Obrázek 15 Komunikace pomocí SPI se třemi zařízeními [21]

6.2.2 Inter-Integrated Circuit - I2C

I2C je sériová multimaster sběrnice, která ke komunikaci využívá dva vodiče: SDA, SCL. Každé zařízení připojené ke sběrnici má svoji unikátní sedmibitovou adresu, což umožňuje adresovat až 128 zařízení, kapacita sběrnice však nesmí přesáhnout hodnotu 400pF. Komunikace je na této sběrnici řízena pomocí metody s detekcí kolize. Každé zařízení může začít vysílat, je-li předtím na sběrnici klidový stav. Zároveň však musí kontrolovat, zda nedochází ke kolizi. Na vodiči SCL master generuje hodinový signál o maximálním kmitočtu 400 kHz. Na vodiči SDA potom probíhá výměna dat. Sběrnice je tedy polovičně duplexní.



Obrázek 16 Ukázka připojení zařízení na sběrnici I2C [22]

6.2.3 Sběrnice USART

Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter neboli USART je univerzální sběrnice, která umožňuje dvěma zařízením komunikovat. Data jsou přenášena pomocí vodičů RXD (přijímač) a TXD (vysílač). Tím, že každé zařízení má svůj vysílač i přijímač, je zajištěna plně duplexní komunikace. Komunikace začíná vysláním start bitu, poté následuje pět až devět datových bitů, následně je komunikace ukončena pomocí jednoho až dvou stop bitů. Sběrnice umožňuje kontrolu správnosti odeslaných dat pomocí paritního bitu.



Obrázek 17 Komunikace pomocí USART mezi dvěma stanicemi

6.2.4 Multiwii Serial Protocol - MSP

Pro komunikaci s nadřazeným systémem pomocí USART využívá Multiwii svůj vlastní protokol. Tento protokol umožňuje odeslat nadřazenému systému informace o stavu stroje, jako nastavený výstup pro motory, data ze snímačů, informaci o aktuálním nastavení PID regulátorů a podobně. Zařízení také může data přijímat, lze tak přepsat některé údaje jako například signál vysílačky, a tedy lze celý stroj i ovládat.

Protokol komunikace je v následujícím tvaru:

<preamble>,<direction>,<size>,<command>,<crc>

- Preamble je ASCII znak '\$M'
- Direction značí směr komunikace
- Size je počet datových bajtů
- Command pomocí message_id určuje, jaká data se mají přenášet
- Crc je kontrola správnosti dat

Podrobnosti o MSP včetně podrobné tabulky příkazů lze nalézt v [23]

6.2.5 Rádiové ovládání

Zařízení může být ovládáno pomocí standardní modelářské vysílačky. Řídicí deska podporuje až osm kanálů, na které je přiváděn servo signál. Mimo to může být na pin A8 přiveden i PPM signál.

Pro ovládání stroje byla vybrána modelářská vysílačka CADET 6, která je zároveň dodávána s přijímačem. Jedná se o šesti kanálovou vysílačku, které má kromě čtyř pákových ovladačů pro proporcionální řízení navíc dva přepínače, které mohou být použity pro ovládání programu kvadrokoptéry.

6.3 Úpravy firmware

Před samotným nahráním programu Multiwii do řídicí desky bylo nutné provést úpravy v kódu, aby vyhovoval hotové desce. Samotné programování bylo provedeno v prostředí Arduino IDE. V souboru *conf.h* se provádí většina nastavení jako například výběr použitých snímačů, nastavení rozložení konstrukce. Výběr je proveden odstraněním symbolu komentáře (dále i odkomentování) před danou definicí. Po výběru snímačů a rozložení kvadrokoptéry bylo nutné upravit rozsah pro ovládání ESC. To bylo provedeno změněním definic *MINTHROTTLE* a *MAXTHROTTLE* na hodnotu 1000, respektive 1750. Tyto hodnoty určují délku trvání vysoké úrovně servo signálu v mikrosekundách.

Po tomto nastavení bylo nutné přenastavit piny pro jednotlivé motory. V souboru *Output.cpp* bylo nejprve nutné nalézt nastavení pro konfiguraci s procesorem ATmega2560 a přepsat nastavení pořadí výstupních pinů pro motory:

```
45 | #if defined(MEGA)
46 |   uint8_t PWM_PIN[8] = {3,8,6,7,2,5,9,10};
47 | #endif
```

Obrázek 18 Nastavení pořadí motorů

Poté bylo nutné ve funkci *writeMotors()* nastavit jednotlivé piny pro první čtyři motory jak zachycuje obrázek 19.

```
257 |   #if (NUMBER_MOTOR > 3)
258 |     #ifndef EXT_MOTOR_RANGE
259 |       //OCR3B = motor[3]<<3; // pin 2
260 |       OCR4B = motor[3]<<3; // pin 7
261 |     #else
262 |       //OCR3B = ((motor[3]<<4) - 16000);
263 |       OCR4B = ((motor[3]<<4) - 16000);
264 |     #endif
```

Obrázek 19 Příklad nastavení jednotlivých motorů

Nakonec bylo nutné ve funkci *initOutput()* přiřadit pinům jednotlivé timery.

```

515  #if defined(MEGA)
516    #if (NUMBER_MOTOR > 0)
517        // init 16bit timer 3
518        TCCR3A |= (1<<WGM31); // phase correct mode
519        TCCR3A &= ~(1<<WGM30);
520        TCCR3B |= (1<<WGM33);
521        TCCR3B &= ~(1<<CS31); // no prescaler
522        ICR3   |= 0x3FFF; // TOP to 16383;
523
524        TCCR3A |= _BV(COM3C1); // connect pin 3 to timer 3 channel C
525    #endif
526    #if (NUMBER_MOTOR > 1)
527        TCCR4A |= _BV(COM4C1); // connect pin 8 to timer 4 channel C
528    #endif
529    #if (NUMBER_MOTOR > 2)
530        // init 16bit timer 4
531        TCCR4A |= (1<<WGM41); // phase correct mode
532        TCCR4A &= ~(1<<WGM40);
533        TCCR4B |= (1<<WGM43);
534        TCCR4B &= ~(1<<CS41); // no prescaler
535        ICR4   |= 0x3FFF; // TOP to 16383;
536
537        TCCR4A |= _BV(COM4A1); // connect pin 6 to timer 4 channel A

```

Obrázek 20 Příklad přiřazení timerů pro piny ovládající motory

Dalším krokem byla úprava rozsahu signálu z RC vysílačky. V souboru *MultiWii.h* se nacházejí dvě definice, a to *MINCHECK* a *MAXCHECK*. Jejich hodnoty musí být upraveny podle rozsahu servo signálu, který dodává přijímač RC ovládání. Pro vysílačku CADET 6 byly experimentálně zjištěny hodnoty 1150 jako minimální hodnota a 1850 jako maximální hodnota.

Po otestování správnosti fungování kvadrokoptéry bylo v kódu přidáno měření napětí dodávaného akumulátorem. V souboru *conf.h* bylo nutné odkomentovat definice *BUZZER* a *VBAT*. Poté bylo možné pomocí definic nastavit tři alarmy pro různá napětí akumulátoru.

Následně byla nadefinována FailSafe definice. Tato funkce kontroluje příjem signálu na kanálech 1-4. Pokud bude délka vysoké úrovně servo signálu kratší nebo rovna 985 mikrosekund, pak se po době definované pomocí definice *FAILSAFE_DELAY* spustí FailSafe procedura. Kvadrokoptéra se srovná a začne pomalu přistávat.

```

601  #define FAILSAFE
602  #define FAILSAFE_DELAY    10
603  #define FAILSAFE_OFF_DELAY 200
604  #define FAILSAFE_THROTTLE (MINTHROTTLE + 200)
605
606  #define FAILSAFE_DETECT_TRESHOLD 985

```

Obrázek 21 Definice FailSafe módu

Takto upravený program zabírá pouze 18976 bytů, což je 7 % paměti pro program. Za běhu zabírá 2760 bytů dynamické paměti procesoru, tedy 33 %. Je tedy vidět, že program má dostatečnou rezervu pro případné rozšíření.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout řídicí jednotku schopnou řízení a stabilizace letu kvadrokoptéry. Jádrem této jednotky je osmi bitový mikroprocesor ATmega 2560, který zpracovává všechna naměřená data a ovládá frekvenční měniče, čímž řídí otáčky jednotlivých motorů. Při návrhu řídicí desky se předpokládalo využití opensource řídicího software.

Před samotným návrhem řídicí jednotky bylo potřeba seznámit se koncepcí kvadrokoptéry a jejím ovládáním, čemuž se věnuje druhá kapitola. Zároveň je v této kapitole vytvořen zjednodušený fyzikální model kvadrokoptéry.

Poté bylo nutné vybrat vhodné motory, vrtule a elektroniku pro řízení motorů. Této problematice se věnuje kapitola číslo tři. Jako vhodné motory byly vybrány BLDC motory značky Turnigy s označením D3530/14 1100KV. Tyto motory jsou řízeny frekvenčními měniči Turnigy Multistar 30 Amp BLHeli Multi-rotor Brushless ESC 2-6S V2.0. Kvadrokoptéra je osazena devíti-palcovým plastovými vrtulami se stoupáním 4,7. Pro zjištění tahu jednoho motoru bylo provedeno měření na konstrukci zapůjčené ÚAMT. Z měření je patrné, že maximální tah jednoho motoru osazeného touto vrtulí je 7,524 N, což odpovídá zvednutí váhy 767 g. Společně s tímto měřením bylo prováděno i měření proudového odběru. Měření bylo provedeno pro dvě hodnoty napájecího napětí a to 11,2 V, což je běžné provozní napětí, a pro napětí 9,6 V, které už je kritické a pokud se hodnota napájecího napětí dostane na tuto úroveň, kvadrokoptéra by měla přistát.

Následně bylo nutno vybrat vhodné snímače pro stabilizaci letu. Proto bylo nutné zjistit, jakých zrychlení může celý stroj dosáhnout a poté teprve bylo možné přejít k výběru. Byla vybrána senzorická deska GY-86, která obsahuje tříosý akcelerometr a gyroskop MPU-6050, který je využit pro zjištění náklonu kvadrokoptéry. Dále deska obsahuje tříosý magnetometr HMC5883L, který je využit pro zjištění azimutu a barometr MS5611 využitý pro zjištění letové výšky stroje. Pro zjištění letové výšky při malých vzdálenostech od země byl vybrán ultrazvukový snímač SRF-08. Všechny tyto snímače komunikují pomocí sběrnice I2C, což zjednodušuje požadavky na konstrukci řídicí desky. Podrobněji se této problematice věnuje kapitola čtyři.

Pátá kapitola se věnuje návrhu a konstrukci samotné řídicí jednotky. Jako první při návrhu byla věnována pozornost mikroprocesoru, který má na starost čtení dat ze senzorů a stará se o regulaci náklonu celé konstrukce kvadrokoptéry. Jako vhodný mikroprocesor byl vybrán mikroprocesor ATmega2560 od firmy Atmel. Jeho výhodou je především možnost komunikace po sběrnících SPI, I2C a až čtyřech sběrnících USART. Tento procesor také obsahuje desetibitový A/D převodník, díky kterému je možné měřit napětí na akumulátoru přímo na řídicí desce. Vzhledem k tomu, že napětí na akumulátoru je příliš velké, bylo nutné jeho hodnotu snížit a stabilizovat, aby bylo možné řídicí desku napájet. Stabilizace napětí baterie na napětí 5 V je provedena pomocí

spínaného stabilizátoru MCP16301/H od firmy Microchip. Toto napájecí napětí je vhodné pro všechny komponenty použité na řídicí desce. Nicméně pro možnost budoucího rozšíření byl přidán lineární stabilizátor napětí LD117AS33TR, který stabilizuje vstupní napětí 5 V na hodnotu 3,3V.

Pro komunikaci s okolím byly vyvedeny sběrnice SPI, I2C a čtyři USART porty. Dva USART porty byly přizpůsobeny pro zařízení pracující na 3,3 V logice jako jsou některé přijímače GPS. Vytvořená deska podporuje komunikaci s klasickými modelářskými vysílačkami. Pro tento účel bylo vyvedeno osm analogových pinů, které jsou schopny přerušení. Pro ovládání jednotlivých motorů, respektive komunikaci s frekvenčními měniči, byly vyvedeny čtyři piny, které jsou schopné pulsní šířkové modulace.

Pro mechanickou ochranu řídicí desky byl vytvořen ochranný kryt. Jedná se o jednoduchou podložku, do které se deska zasadí a kolem ní se osadí ramena, která řídicí desku chrání v případě pádu. Celá tato ochranná krabice byla vytištěna na 3D tiskárně z materiálu ABS.

Poslední kapitola je věnována softwarové části práce. Pro řízení kvadrokoptéry byl vybrán a úspěšně implementován opensource program Multiwii ve verzi 2.4.

Bylo dosaženo původního cíle práce, a to vytvoření řídicí desky. Předpokládá se další rozšiřování tohoto projektu, a to hlavně přidání nadřazeného systému, který umožní automatické inteligentní řízení a stavba nové konstrukce, která bude mít lepší letové vlastnosti, bude šetřit místo a zároveň lépe chránit elektroniku letounu.

Na obrázku 22 je zachycen stroj v letu. V příloze F je poté nachází fotodokumentace celého letounu.



Obrázek 22 Vytvořená kvadrokoptéra za letu

BIBLIOGRAFIE

- [1] HOFFMANN, Gabriel, Haomiao HUANG, Steven WASSLANDER a Claire TOMLIN. *Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment: Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit* [online]. Hilton Head, South Carolina, 2007 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/f6a9/522225a98956d390f3d342244868867c472c.pdf>
- [2] GÁBRLÍK, PETR. *Quadrocopter - stabilizace a regulace*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [3] VOMOČIL, JAN. *Quadrocopter - řídicí jednotka a komunikace*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [4] Let's Build an open source Quadcopter. *Open Electronics* [online]. Open Electronics, 2016 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.open-electronics.org/lets-build-an-open-source-quadcopter-part1/>
- [5] *Next Generation UAVP* [online]. AmirGuindehi, 2016 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <https://ng.uavp.ch/FrontPage>
- [6] The Drone Pi. *Instructables* [online]. Autodesk, Inc, 2016 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/The-Drone-Pi/?ALLSTEPS>
- [7] BRADÁČ, František. *Quadrokopter – stabilizace pomocí inerciálních snímačů*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [8] RollPitchYaw. In: *Theboredengineers* [online]. theboredengineers, b.r. [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://theboredengineers.com/WordPress3/wp-content/uploads/2012/05/PitchRollYaw.png>
- [9] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika 1. 5*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [10] KREJČÍ, Ondřej. *Řídicí jednotka pro BLDC motor*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Procházka, Ph.D.
- [11] HOLOUBEK, David. *Metodika a zpracování měření u neznámých BLDC motorů*. Brno, 2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

- [12] BENEŠ, Jan. *Výškoměr pro rc modely letadel*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Prokopec, Ph.D.
- [13] *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification* [online]. 3.4. 1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A: InvenSense Inc, 2013 [cit. 2017-01-06]. ISBN PS-MPU-6000A-00. Dostupné z: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- [14] *3 - Axis Digital Compass IC HMC 58 8 3 L* [online]. E. 12001 Highway 55 Plymouth, MN 55441: Honeywell International Inc., 2010 [cit. 2017-01-06]. ISBN 900405. Dostupné z: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf
- [15] *MS5611-01BA03* [online]. 1. Northport Loop West Fremont: TE connectivity, 2015 [cit. 2017-01-06]. ISBN DA5611-01BA03_11. Dostupné z: <http://www.te.com/usa-en/product-CAT-BLPS0036.html>
- [16] SRF08 Ultra sonic range finder: Technical Specification. *Robot Electronics* [online]. b.r. [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf08tech.html>
- [17] *Devantech SRF08 UltraSonic Ranger* [online]. 1. b.r. [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://coecsl.ece.illinois.edu/ge423/DevantechSRF08UltraSonicRanger.pdf>
- [18] *Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V* [online]. 1. San Jose, CA 95110 USA: Atmel, 2014 [cit. 2017-01-06]. ISBN 2549QS. Dostupné z: <http://www.atmel.com/devices/atmega2560.aspx>
- [19] *MCP16301/H: High-Voltage Input Integrated Switch-Step-Down Regulator* [online]. 1. Atlanta: Microchip Technology Inc., 2015 [cit. 2017-05-14]. ISBN DS20005004D. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005004D.pdf>
- [20] *LD1117 SERIES: Low drop fixed and adjustable positive voltage regulators* [online]. 1. Austria: STMicroelectronics, 2005 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LD1117V33.pdf>
- [21] SPI three slaves. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface#/media/File:SPI_three_slaves.svg
- [22] I2C diagram. In: *Totalphase* [online]. SUNNYVALE: Total Phase, Inc., 2017 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://www.totalphase.com/support/article_attachments/200093557/I2C-diagram.png
- [23] Multiwii Serial Protocol. *Multiwii* [online]. Multiwii, 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.multiwii.com/wiki/index.php?title=Multiwii_Serial_Protocol

Seznam příloh

Příloha A	Výsledek měření tahu a odběru motoru pro 11,2 V a 9,6 V
Příloha B	Schéma zapojení řídicí desky
Příloha C	Seznam součástí řídicí jednotky
Příloha D	Předloha pro výrobu plošného spoje
Příloha E	Osazovací plány DPS řídicí jednotky
Příloha F	Fotodokumentace

Příloha A

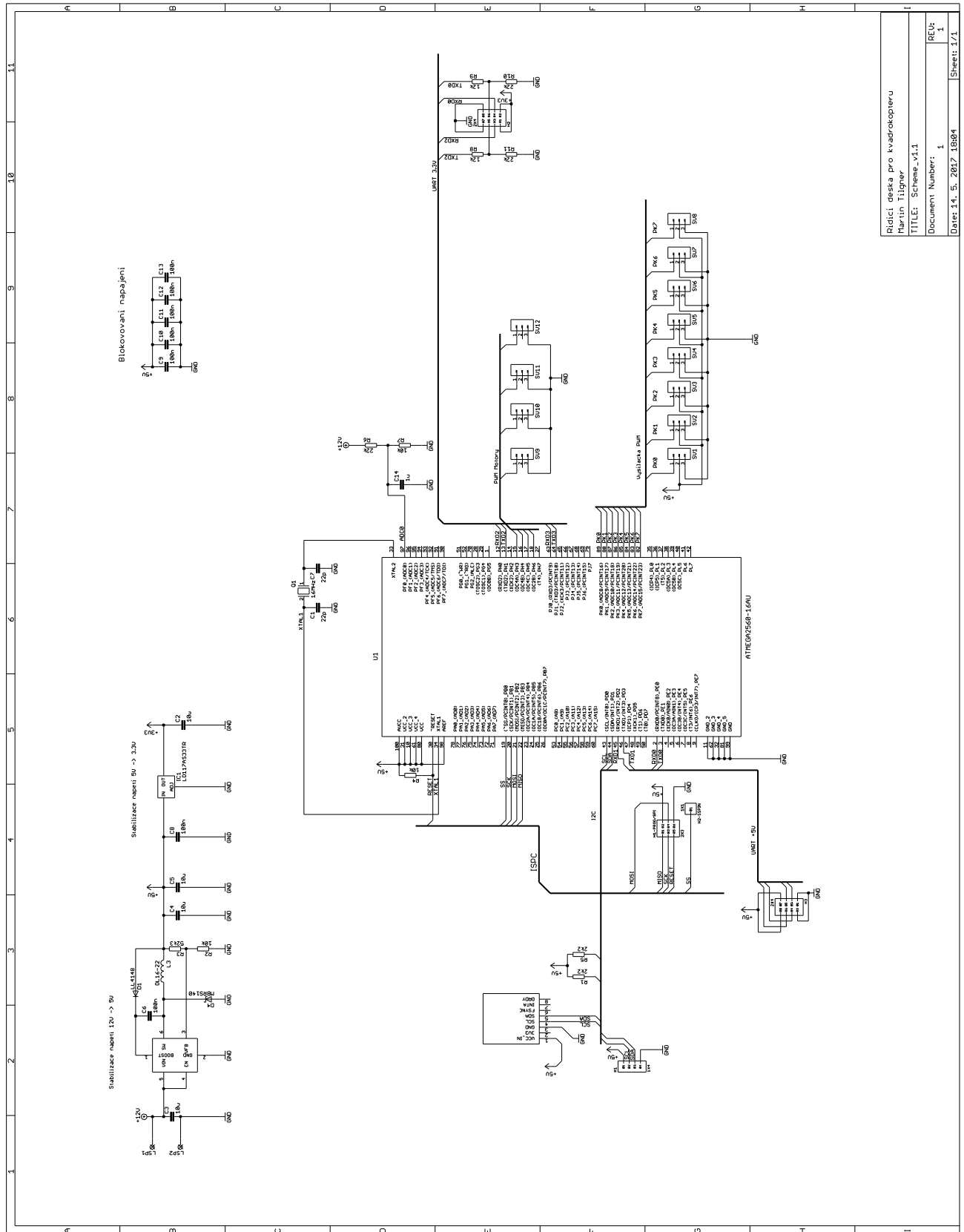
Příloha A 1 Měření tahu a proudového odběru motoru pro 11,2 V

	Měření tahu a proudového odběru motoru pro 11,2 V							
puls	Min [g]	Max [g]	M prům [g]	Tah [g]	Tah [N]	Imin [A]	Imax [A]	I prům [A]
1000	1183,0	1183,0	1183,0	0,0	0,000	0,00	0,00	0,00
1050	1183,0	1183,0	1183,0	0,0	0,000	0,00	0,00	0,00
1100	1175,0	1175,0	1175,0	8,0	0,078	0,20	0,20	0,20
1150	1143,0	1143,0	1143,0	40,0	0,392	0,40	0,40	0,40
1200	1109,0	1109,0	1109,0	74,0	0,726	0,70	0,80	0,75
1250	1064,0	1068,0	1066,0	117,0	1,148	1,20	1,20	1,20
1300	1018,0	1026,0	1022,0	161,0	1,579	1,70	1,70	1,70
1350	979,0	987,0	983,0	200,0	1,962	2,30	2,30	2,30
1400	933,0	943,0	938,0	245,0	2,403	2,80	2,80	2,80
1450	873,0	886,0	879,5	303,5	2,977	3,70	3,80	3,75
1500	805,0	816,0	810,5	372,5	3,654	4,70	5,00	4,85
1550	729,0	743,0	736,0	447,0	4,385	6,10	6,30	6,20
1600	652,0	683,0	667,5	515,5	5,057	7,40	7,80	7,60
1650	582,0	603,0	592,5	590,5	5,793	9,10	9,40	9,25
1700	500,0	530,0	515,0	668,0	6,553	10,80	11,20	11,00
1750	417,0	440,0	428,5	754,5	7,402	13,30	13,60	13,45
1800	401,0	431,0	416,0	767,0	7,524	13,90	14,20	14,05
1850	401,0	431,0	416,0	767,0	7,524	13,90	14,20	14,05

Příloha A 2 Měření tahu a proudového odběru motoru pro 9,6 V

	Měření tahu a proudového odběru motoru pro 9,6V							
puls	Min [g]	Max [g]	M prům [g]	Tah [g]	Tah [N]	I [A]	I_{max} [A]	I prům [A]
1000	1183,0	1183,0	1183,0	0,0	0,000	0,00	0,00	0,00
1050	1183,0	1183,0	1183,0	0,0	0,000	0,00	0,00	0,00
1100	1175,0	1175,0	1175,0	8,0	0,078	0,10	0,10	0,10
1150	1154,0	1154,0	1154,0	29,0	0,284	0,40	0,40	0,40
1200	1123,0	1124,0	1123,5	59,5	0,584	0,60	0,60	0,60
1250	1091,0	1093,0	1092,0	91,0	0,893	1,00	1,00	1,00
1300	1056,0	1060,0	1058,0	125,0	1,226	1,50	1,50	1,50
1350	1022,0	1024,0	1023,0	160,0	1,570	1,90	1,90	1,90
1400	986,0	994,0	990,0	193,0	1,893	2,40	2,40	2,40
1450	941,0	948,0	944,5	238,5	2,340	3,00	3,10	3,05
1500	893,0	902,0	897,5	285,5	2,801	3,90	3,90	3,90
1550	837,0	847,0	842,0	341,0	3,345	4,80	5,00	4,90
1600	769,0	785,0	777,0	406,0	3,983	5,90	6,10	6,00
1650	695,0	720,0	707,5	475,5	4,665	7,30	7,60	7,45
1700	632,0	659,0	645,5	537,5	5,273	8,90	9,20	9,05
1750	579,0	589,0	584,0	599,0	5,876	10,70	10,90	10,80
1800	551,0	571,0	561,0	622,0	6,102	11,30	11,40	11,35
1850	551,0	571,0	561,0	622,0	6,102	11,30	11,40	11,35

Příloha B



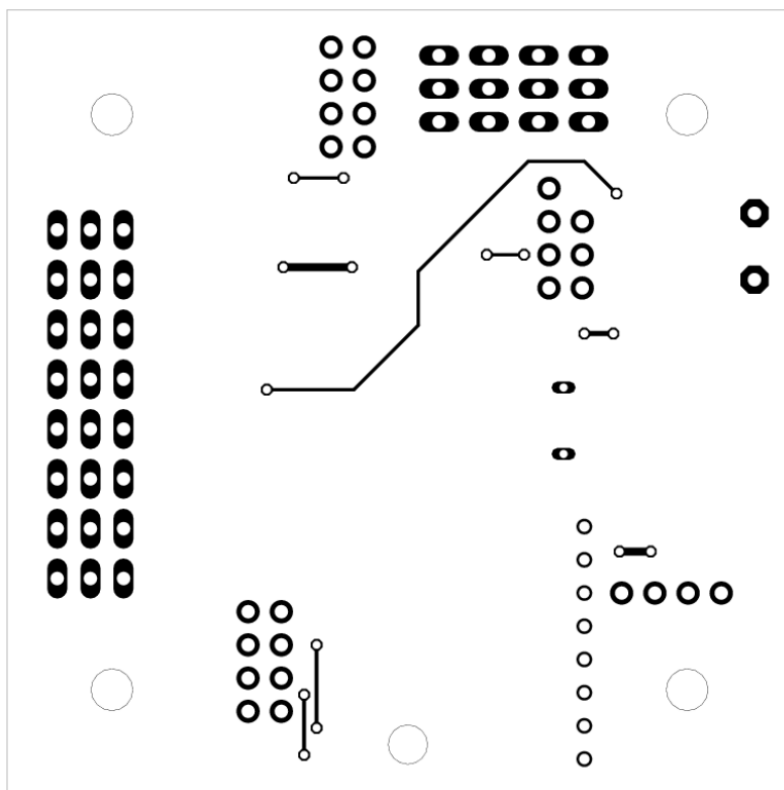
Príloha C

Partlist exported from C:/Users/martin/AppData/Roaming/SPB_16.6/eagle/QuadBoard v1.1/Scheme_v1.1.sch at 9. 5. 2017 17:04

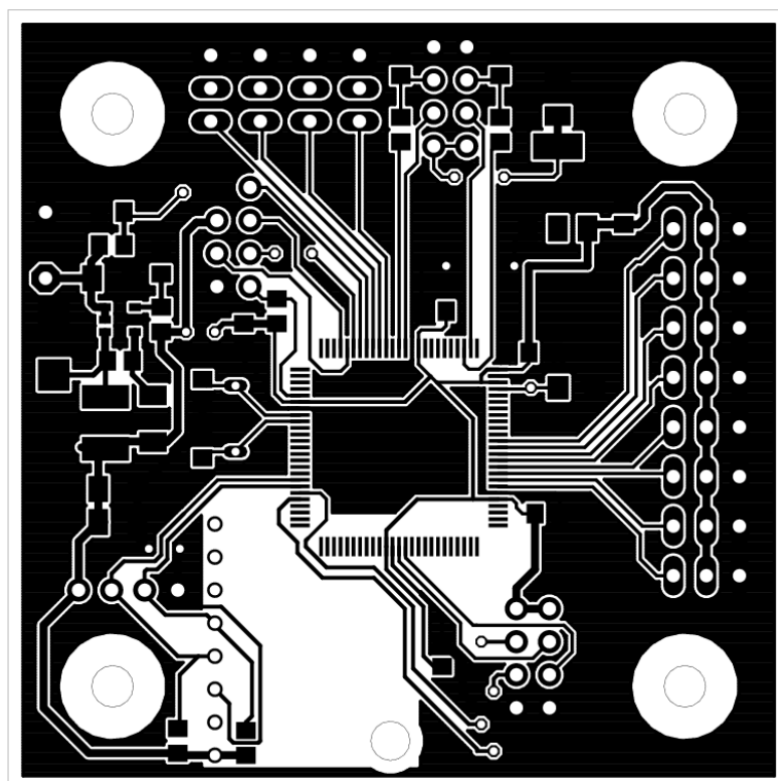
Qty	Value	Device	Package	Parts	Description
12		MA03-1	MA03-1	SV1, SV2, SV3, SV4, SV5, SV6, SV7, SV8,	
7	100n	C-EUC0805	C0805	SV9, SV10, SV11, SV12	PIN HEADER
3	10k	R-EU_R0805	R0805	C6, C8, C9, C10, C11, C12, C13	CAPACITOR, European symbol
4	10u	C-EUC1206K	C1206K	R2, R4, R7	RESISTOR, European symbol
2	12k	R-EU_R0805	R0805	C2, C3, C4, C5	CAPACITOR, European symbol
1	16MHz	XTAL/S	QS	R8, R9	RESISTOR, European symbol
1	1X1	1X1	1X1	Q1	CRYSTAL
1	1X4	1X4	1X4	H2-SSPIN	
1	1u	C-EUC1206	C1206	H1	
3	22k	R-EU_R0805	R0805	C14	CAPACITOR, European symbol
2	22p	C-EUC0805	C0805	R6, R10, R11	RESISTOR, European symbol
1	2X3	2X3	2X3	C1, C7	CAPACITOR, European symbol
2	2X4	2X4	2X4	H1-PROG/SPI	
2	2K2	R-EU_R0805	R0805	H2, H3	
1	52k3	R-EU_R0805	R0805	R1, R5	RESISTOR, European symbol
1	ATMEGA2560-16AU	ATMEGA2560-16AU	QFP50P1600X1600X120-100N	R3	RESISTOR, European symbol
1	DL16-22	L-USL4532P	L4532P	U1	Microcontroller
1	GY-86	GY-86	GY-86	L3	INDUCTOR, American symbol
1	LD117AS33TR	LD117AS33TR	SOT223	GY-86	Low drop fixed and adjustable positive voltage regulators 1 A
1	LL4148	CGRM4007-G	SOD-123_MINI-SMA	IC1	
1	MBRS140	MBRS130LT3	SMB	D1	Molded plasitc,JEDEC SOD-123/Mini SMA
1	MCP16301/H	MCP16301/H	SOT23-6	D4	Schottky Power Rectifier
1	PWR+	LSP10	LSP10	IC2	High-Voltage Input Integrated Switch
1	PWR-	LSP10	LSP10	LSP1	Step-Down Regulator
				LSP2	SOLDER PAD drill 1.0 mm, distributor
					Buerklin, 12H555
					SOLDER PAD drill 1.0 mm, distributor
					Buerklin, 12H555

Příloha D

Copper TOP

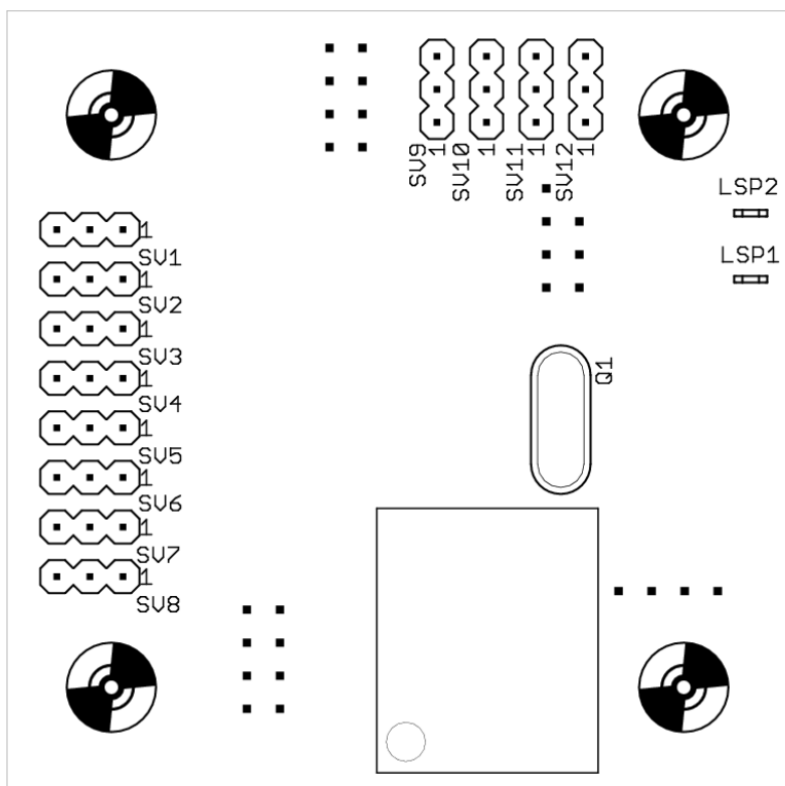


Copper BOTTOM

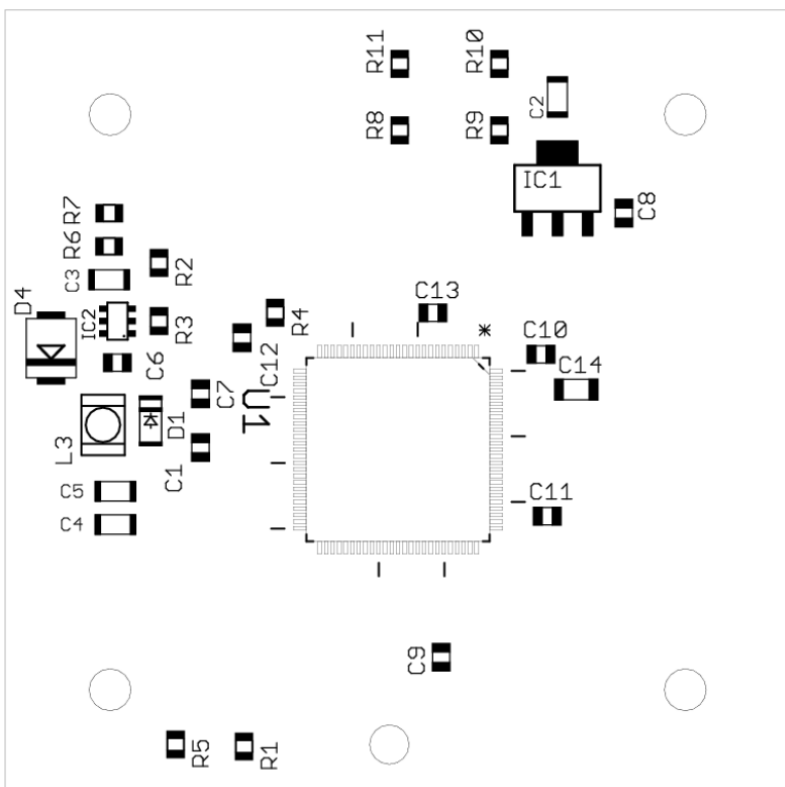


Příloha E

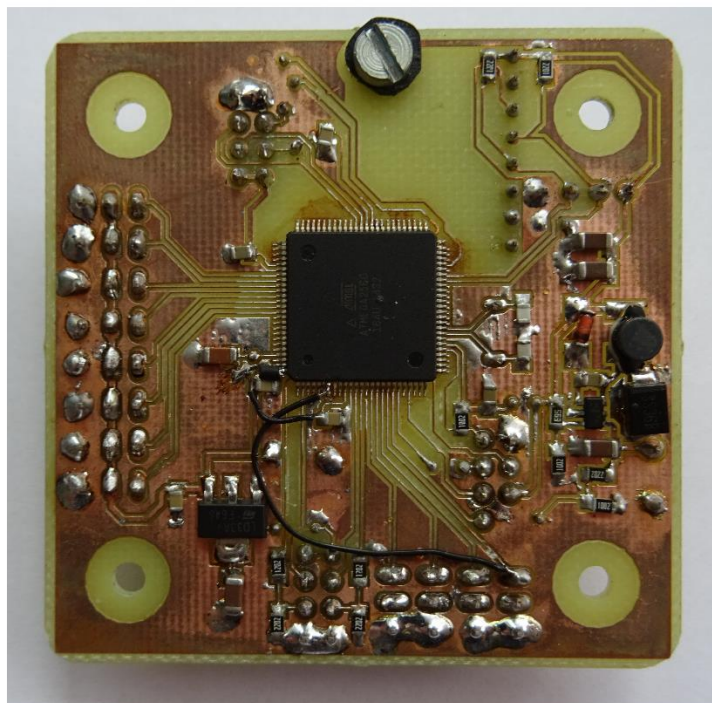
Placement TOP



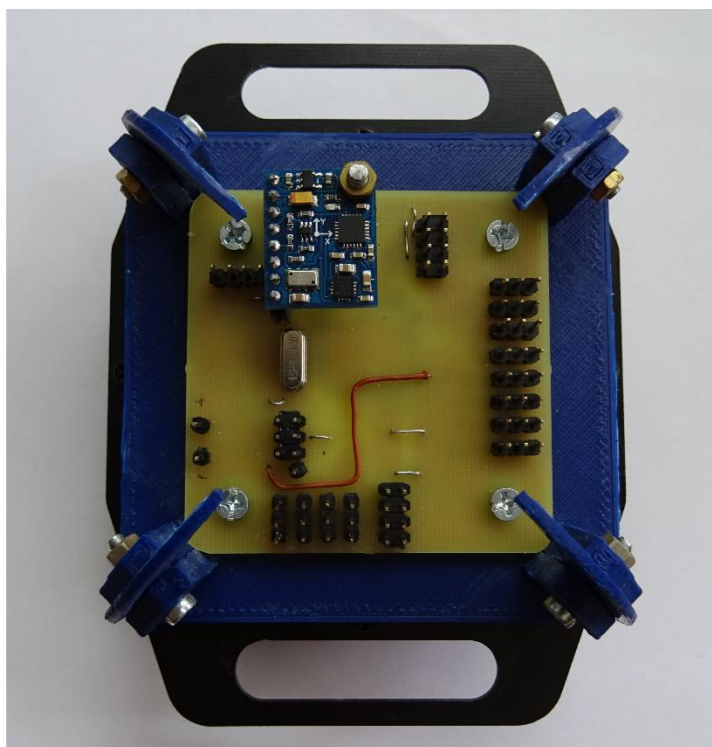
Placement BOTTOM



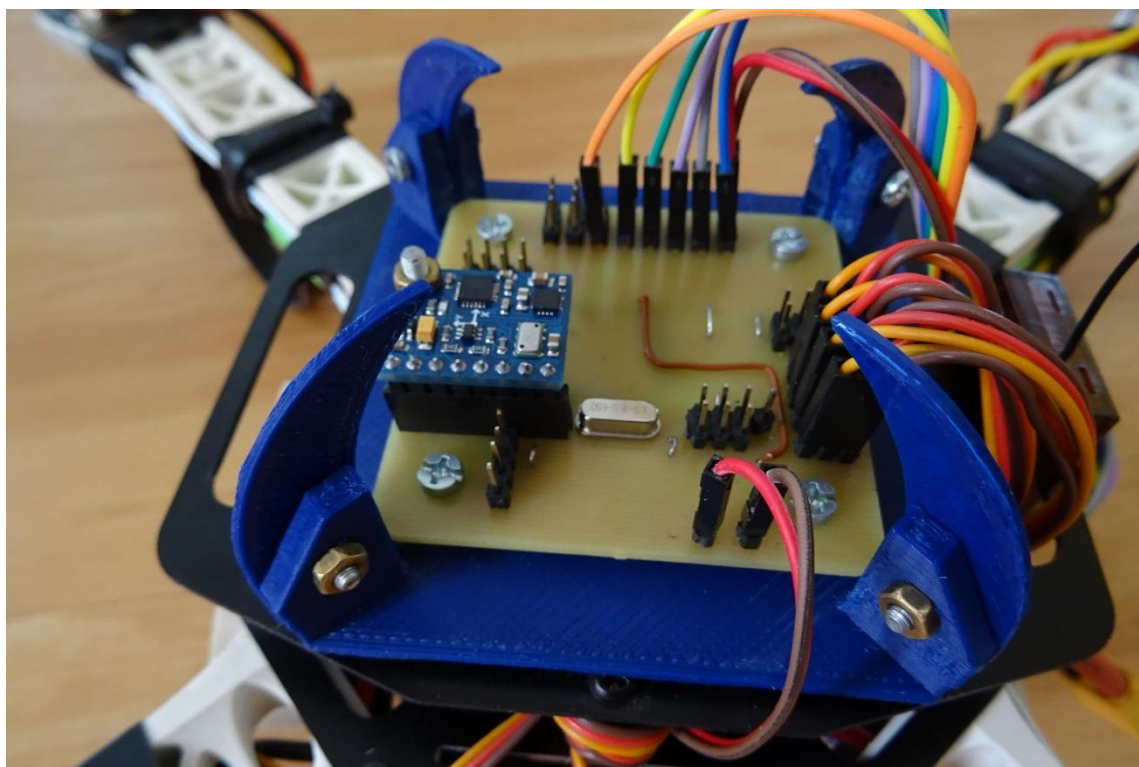
Příloha F



Příloha F 1 Detail na spodní stranu DPS řídicí desky



Příloha F 2 Detail na vložení DPS řídicí desky do ochranného krytu



Příloha F 3 Detail na připojení vodičů k DPS řídicí desky



Příloha F 4 Vytvořená kvadrokoptéra